# PROGRAMME

OU

RÉSUMÉ DES LEÇONS

D'UN

# COURS DE CONSTRUCTIONS.

PARIS. — IMPRIMERIE ET FONDERIE DE FAIN, 4, RUE RACINE

# PROGRAMME

OU

RÉSUMÉ DES LEÇONS

D'UN

# COURS DE CONSTRUCTIONS,

AVEC DES APPLICATIONS TIRÉES SPÉCIALEMENT

## DE L'ART DE L'INGÉNIEUR DES PONTS ET CHAUSSÉES,

OUVRAGE

De feu **M.-J. SGANZIN**,

Inspecteur général des ponts et chaussées et des travaux maritimes des ports militaires, ancien professeur à l'École polytechnique, commandeur de la Légion-d'Honneur, chevalier de l'ordre royal de Saint-Michel.

QUATRIEME ÉDITION,

ENRICHIE D'UN ATLAS VOLUMINEUX, ENTIÈREMENT REFONDUE ET CONSIDÉRABLEMENT AUGMENTÉE AVEC LES NOTES ET PAPIERS DE L'AUTEUR, AVEC CEUX DE M. DE LAMBLARDIE FILS, INSPECTEUR GÉNÉRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES ET DES TRAVAUX MARITIMES, ET AVEC DIVERS AUTRES DOCUMENTS;

Par M. REIBELL,

Ingénieur en chef de première classe des ponts et chaussées, directeur des travaux maritimes, chevalier de la Légion-d'Honneur, *agissant comme mandataire de la famille de feu M. Sganzin.*

**TOME PREMIER,**

RÉSISTANCE DES MATÉRIAUX, FONDATIONS EN GÉNÉRAL, ROUTES ORDINAIRES, CHEMINS DE FER, PONTS ET VIADUCS FIXES EN MAÇONNERIE, EN BOIS ET EN MÉTAL, PONTS SUSPENDUS, PONTS MOBILES.




PARIS,

CARILIAN-GŒURY ET V. DALMONT, ÉDITEURS,

LIBRAIRES DES CORPS ROYAUX DES PONTS ET CHAUSSÉES ET DES MINES,

Quai des Augustins, n. 39 et 41

1839.



# AVANT-PROPOS.

Dans la publication de la quatrième édition de l'ouvrage de feu M. Sganzin, on a cherché à le rendre plus digne encore de la faveur avec laquelle les éditions antérieures avaient été accueillies; en lui donnant une classification plus méthodique; en y introduisant les principales modifications qui sont survenues depuis sa première publication dans l'état des connaissances techniques; en y développant quelques articles qui semblaient trop succints; enfin, en le complétant par quelques notions sur les chemins de fer, les ponts fixes en fer, les ponts suspendus, les ponts mobiles, les irrigations, les desséchements, les conduits d'eaux, les arsenaux maritimes, les travaux de défense à la mer, les dunes, et les phares.

Les notes et dessins trouvés dans les papiers de feu M. Sganzin, ceux qui avaient été recueillis par M. de Lamblardie fils, inspecteur général des ponts et chaussées et des travaux maritimes, divers mémoires publiés ou inédits de ce dernier, ont concouru avec des compulsations faites dans un grand nombre de recueils et manuscrits, avec les communications obligeantes de plusieurs Ingénieurs des constructions navales et des ponts et chaussées, à la refonte de l'ouvrage primitif.

Un atlas très-étendu, gravé par *Adam*, qui présentera plus de cinq cents groupes de figures, facilitera l'intelligence du texte et en complétera les indications.

On trouvera ainsi réunies dans un seul ouvrage les notions principales

sur les divers travaux publics vers lesquels la France et l'étranger se portent aujourd'hui avec une activité progressive.

Toutefois on n'a rien changé au cadre primitif de l'ouvrage de feu M. Sganzin; on n'a pas dû s'écarter de son but originaire. Ce but n'était point de présenter au public un *traité théorique et pratique des constructions de toute espèce*, et de concentrer ainsi tout ce qui est disséminé dans une foule de livres volumineux, tant anciens que modernes; mais seulement d'énoncer sous une forme sommaire les principales *données* des travaux, en renvoyant pour les détails aux traités spéciaux publiés jusqu'à ce jour.

Au reste, ce n'est que pour déférer *à la volonté expresse* de la famille de feu M. Sganzin, que la nouvelle édition *indique le nom de celui qu'une confiance affectueuse avait chargé de la refonte de l'ouvrage primitif.*

# NOTICE

SUR LA VIE ET LES SERVICES

# DE FEU M. SGANZIN.

( Extrait des *Annales maritimes et coloniales* de 1837. )

Chaque jour s'éclaircissent les rangs des hommes qui ont rempli de hautes fonctions publiques aux époques mémorables de la révolution, de l'Empire et de la Restauration, et qui ont été associés aux vicissitudes et aux travaux de près d'un demi-siècle. Celui qui fut longtemps le doyen des inspecteurs généraux des ponts et chaussées, qui avait dévoué quarante ans de sa vie au service de la marine, M. Sganzin (Joseph-Mathieu), vient de suivre dans la tombe les Liard, les Cachin, les Bruyère, les Girard et les Brisson, qu'il avait précédés dans une carrière parcourue glorieusement avec eux.

Né à Metz, le 1er octobre 1750, il appartenait à une famille d'origine italienne, venue en France à la suite des guerres du Piémont.

Après avoir terminé ses études au collége de Metz, il entra, le 6 novembre 1768, à l'École des ponts et chaussées, dirigée alors par le célèbre Peyronnet.

L'enseignement préparatoire commun aux divers services publics, si heureusement établi depuis à l'École polytechnique, n'existait point encore, et les écoles spéciales de cette époque complétaient à la fois les études scientifiques des colléges, et initiaient à leurs applications techniques.

M. Sganzin, après sept ans de noviciat, fut nommé sous-ingénieur le 1er avril 1775; ce titre correspondait à celui actuel d'ingénieur ordinaire de deuxième classe des ponts et chaussées.

Son début dans les fonctions actives fut très-brillant : il eut à tracer en pays de montagnes et à exécuter plusieurs routes du premier ordre dans les anciennes provinces du Rouergue et du Quercy, et ses travaux eurent des résultats si grands pour la prospérité de ces contrées, qu'elles ont conservé fidèlement la mémoire de M. Sganzin. On cite encore aujourd'hui la reconstruction, sur fondation en béton, d'une pile du vieux pont de Cahors, comme l'une des opérations difficiles de l'art de l'ingénieur, et l'une des premières applications de ce genre de fondations.

Sa réussite fit nommer M. Sganzin, le 1er août 1785, Inspecteur des ponts et chaussées, grade supprimé depuis, et alors intermédiaire à ceux de sous-ingénieur et d'ingénieur en chef. M. Sganzin fut attaché en cette qualité aux grands travaux du port du Havre sous les ordres de feu M. de Lamblardie, qui était chargé de leur direction.

C'est là que se forma, entre ces deux collaborateurs, une intimité favorisée par la faible distance des âges, l'analogie des goûts et des facultés, et cimentée par la communauté des plus nobles sentiments.

Les divers pouvoirs qui se succédèrent pendant la tourmente de la première révolution, semblent avoir pressenti l'heureuse influence pour le service, de cette liaison, de cette identité de vues entre ces deux habiles ingénieurs, et ont cherché à la développer.

Ainsi, dès que M. de Lamblardie, en 1793, eut quitté le Havre où son nom subsiste encore sur les bassins et les quais qu'il y a fait construire, il y fut remplacé par M. Sganzin, élevé au grade d'Ingénieur en chef. Ce dernier entreprit seul les travaux de la grande écluse de la Barre.

Plus tard, en 1795, M. Sganzin fut appelé à Paris, d'après la désignation de son ancien chef, pour être son collaborateur au conseil placé près la commission des travaux publics, et pour être à la fois chargé de la direction du dépôt des cartes et plans.

Nos armées victorieuses venaient de pénétrer dans la Belgique et la Hollande, et d'en repousser les forces anglo-russes.

Le gouvernement français chargea M. Sganzin et M. Mandar (actuellement Ingénieur en chef des ponts et chaussées en retraite), d'explorer tous les travaux intérieurs et maritimes de la Hollande, et d'étudier les divers systèmes d'exécution qui y étaient suivis.

Malheureusement la précieuse collection de dessins et de notes recueillis dans cette mission, et qui existait encore dans les mains de la veuve de M. Sganzin, n'a point été publiée : les nombreuses occupations de M. Sganzin, pendant sa carrière si active, y ont toujours mis obstacle.

Il était revenu à Paris en 1798, quand une mort inopinée vint frapper feu M. de Lamblardie dans la force de l'âge, dans toute la maturité de son talent, et lorsque l'École polytechnique, dont il avait été l'un des fondateurs et professeurs, et le premier directeur, lui promettait la plus noble récompense de ses travaux par l'éclat qu'elle commençait à répandre.

Cette fois encore, le Directoire ne crut pouvoir remplir le vide profond que la mort de M. de Lamblardie avait laissé dans le service des travaux de la marine et dans l'enseignement de l'École polytechnique, qu'en appelant M. Sganzin à ces doubles fonctions.

M. Sganzin joignit à cette espèce d'héritage un autre plus sacré : il voulut être le père adoptif de la jeune famille que son ami lui léguait, et unit à jamais son sort aux enfants de M. de Lamblardie en épousant leur mère.

Peu de temps après, à la suite d'une descente opérée par les Anglais sur les côtes de la Belgique, et dans laquelle ils détruisirent la grande écluse de Slykens, près Ostende, M. Sganzin fut chargé, par mission extraordinaire, de rétablir ce grand ouvrage d'art, qui renfermait deux sas éclusés, pour le passage des grands et petits bâtiments de commerce.

il parvint en moins d'un an, à rendre au commerce l'accès d'un port important pour les expéditions et les relâches dans la Manche.

Dans l'année qui suivit (1799), M. Sganzin reçut le mandat, bien plus important encore, d'organiser les travaux maritimes et l'exécution des nouveaux chantiers de construction du port d'Anvers.

Le Consulat venait de s'élever sur le ruines du Directoire. Le nouveau César était avide de tous les genres de gloire; il voulut que des monuments publics, des grands travaux pour la défense et la richesse du pays, transmissent son nom à la dernière postérité, comme les monuments de la vieille Égypte, qu'il venait de conquérir, avaient été destinés à transmettre ceux de leurs fondateurs.

Son génie organisateur réédifia l'administration des ponts et chaussées, et institua pour la marine un conseil des travaux maritimes, composé d'abord de trois membres, et auquel il appela MM. Sganzin, Cachin et Ferregeau, en leur conservant leur participation aux délibérations de l'assemblée générale des ponts et chaussées, dont les Ingénieurs en chef faisaient partie à cette époque. M. Sganzin, dès son entrée dans ces nouvelles fonctions, eut à rétablir le service des travaux maritimes dans les ports placés dans ses attributions.

Une impulsion énergique était donnée à la fois, par le premier consul, aux grands travaux de routes, de navigation intérieure, de ponts, et à ceux des ports de commerce et des ports militaires de la France agrandie.

Napoléon traitait quelquefois sans intermédiaire les plus graves questions d'art soulevées par ses vastes projets, avec les hommes spéciaux qu'il avait distingués dans les divers services publics. M. Sganzin dut à ces relations la confiance honorable et la bienveillance constante et marquée que l'empereur ne cessa de lui témoigner.

Une circonstance puérile en apparence, fera ressortir l'ardeur avec laquelle le génie de Napoléon se portait vers les conceptions des grands travaux publics; un soir, après son dîner, au camp de Boulogne, il fit appeler M. Sganzin auprès de lui pour l'examen de quelques-uns de ces projets. Après plusieurs heures de travail, Napoléon s'aperçut de la fatigue de son interlocuteur, et apprit de lui qu'il était à jeun; il sonne aussitôt, fait servir, dans son propre cabinet, un souper à M. Sganzin, et, pendant que celui-ci réparait ses forces, il continue avec lui la discussion interrompue, en écrivant en quelque sorte sous sa dictée.

L'empereur voulait d'ailleurs qu'on lui remît les ébauches et les premières minutes des mémoires et rapports qu'il avait demandés; soit pour mieux apprécier la capacité des rédacteurs, soit pour surprendre les *premiers jets* de leurs pensées, et voir lui-même les questions sous les faces où elles avaient été d'abord envisagées.

M. Sganzin ne tarda pas à être promu au grade le plus élevé du corps des ponts et chaussées; un arrêté du premier consul, du 30 messidor an XI (19 juin 1803), le fit Inspecteur général des ponts et chaussées; et, quelques mois après, il fut décoré de la Légion-d'Honneur.

M. Sganzin réclama aussitôt, mais vainement, auprès de l'empereur, le même avancement pour ses collègues, MM. Cachin et Ferregeau.

Depuis lors M. Sganzin fut appelé à accompagner Napoléon dans tous les voyages qu'il fit dans les ports de mer de l'empire, et reçut de lui les missions les plus importantes, tantôt seul,

tantôt avec l'illustre académicien que la haute sagacité du Roi vient d'appeler à la pairie.

Ainsi M. Sganzin eut à organiser de 1804 à 1805, tous les travaux de Boulogne et des ports de la Manche, lors de la descente projetée en Angleterre. Subséquemment il fut associé à toutes les grandes vues de l'empereur sur les ports d'Anvers, de Flessingue, du Helder, de Niewdiep, et de divers autres ports de Belgique et de Hollande.

Dans un premier voyage en Italie, en 1805, avec MM. de Prony et Sané, M. Sganzin prépara avec eux les vastes projets conçus par l'empereur pour les ports de Gênes et de la Spezzia.

Il avait à peine satisfait à cette mission, qu'il se rendit en Belgique pour présider à l'élargissement de la grande écluse de Flessingue, dont l'exécution fut confiée à M. Boistard, alors Ingénieur en chef des travaux maritimes, et à M. Lamblardie fils, Ingénieur ordinaire (1). En moins d'un an, et avec une médiocre dépense, ce grand ouvrage hydraulique put donner passage aux vaisseaux de ligne, par l'emploi d'un système entièrement nouveau, et qui trouvera probablement de fréquentes applications dans les grandes écluses des ports de commerce, lorsqu'il faudra les approprier aux dimensions des bateaux à vapeur.

L'élargissement dont il s'agit eut lieu dans la partie supérieure de l'écluse de Flessingue, par des refouillements pratiqués dans les anciennes maçonneries; et en effectuant une section horizontale dans les portes primitives, de manière que la partie inférieure conservée servît de heurtoir à de nouvelles portes établies dans la partie supérieure élargie.

Une seconde mission en Italie, à la fin de 1806, où M. Sganzin fut associé à M. de Prony, eut pour objet de faire sortir de ses ruines l'antique port de Venise, qui avait été le berceau de la marine moderne.

Enfin M. Sganzin, à la fin de 1807, accompagna l'empereur à Venise, et fut chargé de l'exploration de divers ports de l'Adriatique, du Frioul et de l'Illyrie.

A peine le drapeau français avait pénétré en Espagne que Napoléon avait déjà, en 1808, dirigé son regard d'aigle sur les ports de cette nouvelle conquête; et cette fois encore MM. de Prony et Sganzin reçurent l'ordre d'examiner tous les ports de la côte, depuis Bayonne jusqu'à Saint-Sébastien, et de réunir les matériaux nécessaires à la rédaction des projets que l'empereur avait formés. Les vicissitudes de nos armes, d'autres préoccupations politiques vers l'est et le nord de l'Europe, empêchèrent de donner suite aux vues de Napoléon sur les ports espagnols.

---

(1) En 1809 cette écluse fut détruite par les Anglais, lors de l'une des expéditions qu'ils firent dans l'île de Wacheren. On la fit reconstruire immédiatement, et l'on profita de cette circonstance pour en abaisser le radier et pour l'élargir sur toute la hauteur de ses bajoyers, de manière qu'il ne fut plus nécessaire de recouper les portes brusquées dans leur hauteur, et qu'il suffit de les fermer au moyen de portes entièrement pleines. M. Boistard, Ingénieur en chef des travaux maritimes, et M. Minard, Ingénieur ordinaire, furent chargés de ce nouveau travail.

Ces missions lointaines, la participation aux discussions du conseil des travaux maritimes et à celles du conseil général des ponts et chaussées; des voyages à la suite de l'empereur dans les ports de la Belgique et de la Hollande, de 1809 à 1811; des tournées spéciales dans quelques ports de l'ancienne France, n'interrompirent pas le cours dont M. Sganzin était chargé à l'École polytechnique, et même, dès 1807, il eut l'ordre de publier à la hâte ses leçons dans un ouvrage substantiel. Cet ouvrage, sous le titre modeste de *Résumé*, a été longtemps presque le seul guide des élèves de l'École polytechnique, disséminés dans les divers services publics, et parvenu aujourd'hui à sa quatrième édition, a conservé la juste faveur du public.

En 1812, le cours de constructions à l'École polytechnique fut supprimé par des considérations d'économie; et M. Sganzin obtint une retraite de 3,000 fr., réduite à 1,900 fr. en 1818, et qu'il n'a point touchée pendant tout le temps qu'il a été en activité de service.

La jalousie malveillante qu'avait excitée contre lui la confiance que Napoléon lui témoignait, réussit à détourner de M. Sganzin les faveurs du souverain : on parvint à faire croire à l'empereur que M. Sganzin possédait de vastes terres, jouissait d'une grande fortune, malgré l'évidente fausseté de ces allégations.

La Restauration trouva M. Sganzin *simple légionnaire*. En l'investissant seul de l'inspection générale des travaux maritimes des ports militaires autres que Cherbourg, elle le nomma officier de la Légion-d'Honneur en 1814; et postérieurement, en 1819, sur la proposition de M. le baron Portal, alors ministre de la marine, il fut fait chevalier de Saint-Michel.

A cette nouvelle période de sa vie, M. Sganzin, qui arrivait à l'âge de soixante-dix ans, conservait encore toute sa vigueur de corps et d'esprit. Des tournées fréquentes dans les ports, un voyage en Angleterre relatif aux ponts suspendus achetés pour l'île de Bourbon, et dans lequel il contracta une liaison amicale avec le célèbre Brunel; l'examen des projets formés pour la restauration et l'agrandissement des ports de l'ancienne France, oubliés pendant les dernières années de l'Empire, ne l'empêchèrent pas de participer aux délibérations du conseil général des ponts et chaussées, de la commission mixte des travaux publics et de la commission des phares.

La mort de M. Cachin, en 1824, fit compléter les attributions des fonctions de M. Sganzin à la marine, en y faisant rentrer les travaux du port et de la rade de Cherbourg.

A la fin de cette même année, M. Sganzin fut nommé membre de la commission consultative des travaux de la marine, récemment créée; et peu de temps après, en devint le président par son âge et son grade, jusqu'en 1831, où cette commission fut remplacée par le conseil actuel des travaux de la marine, dont il fut également un des membres.

L'affaiblissement graduel de sa mémoire et de ses organes ne permettait plus à M. Sganzin, dans les dernières années de sa vie, de prendre une part active et continue aux divers travaux qui lui étaient confiés; suivant ses désirs les plus chers, le fils de son ancien chef et ami, devenu son fils adoptif, fut placé auprès de lui comme inspecteur adjoint, et lui succéda en avril 1835, lorsque le Roi, en nommant M. Lamblardie Inspecteur général des ponts et chaussées, pourvut à la conciliation des nécessités du ser-

vice, avec les titres de M. de Lambiardie à cet avancement, et avec les convenances de famille. Le cordon de commandeur de la Légion-d'Honneur fut la dernière récompense que M. Sganzin emporta dans sa retraite à quatre-vingt-sept ans, et après *soixante-deux ans* de services effectifs.

Depuis sa retraite jusqu'au 10 janvier 1837, jour de sa mort, prévue depuis plusieurs semaines, M. Sganzin ne manifestait plus que par intervalles quelques lueurs de mémoire. Il s'est éteint à Bougival, près Marly, entouré des soins pieux qui lui avaient été si fidèlement voués pendant près de trente ans ; ne laissant à sa famille adoptive que le seul héritage qu'elle tenait déjà de son illustre père, le souvenir d'une existence noble, désintéressée, et dévouée sans relâche à sa patrie et à ses devoirs.

M. Sganzin laisse deux neveux de son nom, et qui, à son exemple, se sont attachés au service des ponts et chaussées et au département de la marine où ils comptent déjà tous deux de longs et honorables services, l'un comme Ingénieur des travaux maritimes, l'autre comme officier d'artillerie.

Les fonctionnaires de tout rang et de toute arme, avec lesquels M. Sganzin a eu des rapports dans cette longue carrière de soixante-deux ans de service, commencée en 1775, rendront un témoignage unanime de la droiture de ses intentions, de ses talents, de la sagacité de son jugement éclairé par une longue expérience. Les Ingénieurs, qui ont servi sous ses ordres, n'oublieront jamais que, sous une roideur apparente, M. Sganzin entretenait la bienveillance la plus vive, la plus empressée à les assister en toute circonstance, à défendre leurs droits et leurs intérêts, et à provoquer les récompenses dont il les jugeait dignes.

# TABLE DES MATIÈRES

CONTENUES

# DANS LE PREMIER VOLUME.

## PREMIÈRE PARTIE.

MATÉRIAUX,

CONSTRUCTIONS ET FONDATIONS EN GÉNÉRAL.

---

# DEUXIÈME PARTIE.

APPLICATIONS A LA CONSTRUCTION DES ROUTES ET DES CHEMINS DE FER.

---

## TROISIÈME PARTIE.

VIADUCS ET PONTS FIXES, EN MAÇONNERIE, EN CHARPENTE ET EN MÉTAL, PONTS SUSPENDUS, PONTS MOBILES.



---

## APPENDICES.

# PROGRAMME

OU

# RÉSUMÉ DES LEÇONS

D'UN

# COURS DE CONSTRUCTIONS.

## PREMIÈRE PARTIE.

MATÉRIAUX.

### RÉSUMÉ DE LA PREMIÈRE LEÇON.

CLASSIFICATION DES PIERRES. — PROPRIÉTÉS POUR LEUR EMPLOI DANS LES CONSTRUCTIONS. — RÉSISTANCE.

Considérés comme principaux éléments des constructions, les matériaux donnent lieu à deux espèces de recherches :

1° L'examen de leurs parties constituantes et de leurs qualités;

2° Leur emploi.

Parmi les matériaux on distingue principalement,

Les pierres, la brique, la chaux, le sable, le plâtre, les bois et les métaux.

Chacune de ces diverses espèces de matériaux sera particulièrement et successivement examinée.

DES PIERRES.

Les pierres sont le résultat du mélange des terres élémentaires, pures ou combinées avec d'autres substances. Elles forment une nomenclature volumineuse.

*Classification des pierres.*

Les naturalistes qui ont établi la classification des pierres n'ont pas tous suivi la même route.

Les uns ont adopté pour base de classification, les qualités apparentes ou physiques; d'autres ont classé les pierres d'après la forme naturelle d'aggrégation de leurs parties constituantes. C'est le système du célèbre naturaliste Haüy.

Enfin quelques naturalistes, à la tête desquels il faut placer Cronsted, ont classé les pierres d'après leur composition chimique. Aujourd'hui il est généralement reconnu que, pour la formation des espèces minérales, la composition chimique et la cristallographie doivent se prêter mutuel secours. Toutefois le classement chimique des pierres est celui qu'il est convenable d'adopter dans l'art de bâtir.

Ainsi l'on divisera les pierres en

Pierres { argileuses,
calcaires,
gypseuses,
scintillantes ou siliceuses,
et enfin en pierres diverses.

1re classe. Pierres argileuses. Elles sont composées de terre alumineuse, ordinairement mélangée avec la silice et les oxides et sulfure de fer. Elles ne font point effervescence avec les acides; elles sont douces au toucher, composées de lames superposées et susceptibles d'être séparées; tels sont les schistes micacés et les ardoises.

2e classe. Pierres calcaires. Elles font effervescence avec les acides, et sont en général composées de chaux, d'acide carbonique, et ordinairement mélangées d'alumine, de silice, de magnésie, d'oxide de fer et de manganèse, et quelquefois de potasse ou soude.

Elles se réduisent en chaux plus ou moins pure, lorsqu'elles ont été exposées quelque temps à l'ardeur du feu.

Cette classe présente le plus grand nombre de pierres en usage pour les constructions.

Les calcaires purs qui constituent les marbres statuaires se distinguent en calcaires saccharoïdes (ayant le grain du sucre), et calcaires compactes.

Les calcaires impurs présentent une infinité de combinaisons; l'une d'elles, le calcaire magnésien, onctueuse au toucher comme la plupart des pierres où la magnésie entre en proportion notable, s'appelle *dolomie*.

On classe aujourd'hui les calcaires d'après leur position géologique.

Au-dessus du terrain houiller se trouve un calcaire compacte argileux, associé aux marnes, appelé en Allemagne (zech-stein). Quelquefois il est surmonté du calcaire coquillier, dénommé *muschel kalk* dans le même pays.

La formation calcaire superposée aux précédentes est le calcaire à gryphites, que les Anglais ont nommé *lias*. Il renferme beaucoup de fossiles particuliers.

Plus haut encore on trouve les calcaires jurassiques ou oolithiques (c'est-à-dire composés de grains arrondis semblables à des œufs de poisson). Ils contiennent beaucoup de corps organisés à l'état lamelleux.

La craie, le plus moderne des terrains secondaires, comprend des calcaires compactes et de la dolomie.

Les terrains tertiaires renferment deux calcaires principaux, que l'on appelle *calcaire grossier* et *calcaire d'eau douce*. Dans le premier, placé plus bas que le second, on rencontre beaucoup de fossiles, de débris de corps organisés, et une multitude de coquilles. Le second a été ainsi dénommé, parce qu'on n'y trouve que des fossiles d'eau douce. Il est souvent siliceux.

3e CLASSE. Pierres gypseu

Elles sont composées d'acide sulfurique uni à la chaux comme base essentielle.

Elles ne font point effervescence avec les acides, et ainsi que les deux précédentes, elles ne donnent point d'étincelles, étant frappées avec le briquet.

L'espèce la plus utile pour les constructions, parmi les pierres de cette classe, c'est le gypse ou pierre à plâtre.

L'albâtre dont on fait des statues, des vases, des colonnes, appartient aussi à cette classe.

4e CLAS Pierres scint

Elles ne font point effervescence en général avec les acides, et étincellent sous le choc du briquet.

Les roches composées de fragments de pierres de diverse nature, unis par un ciment naturel, tiennent le premier rang dans cette classe. On désigne ces diverses espèces de roches par le nom de la substance dominante, en y ajoutant celui des autres substances qui forment le mélange.

Les principales sont :

La roche feldspathique, qui comprend le porphyre et la siénite.

La roche quartzeuse, qui comprend la pierre meulière, la pierre à fusil, etc.

La roche mixte, formée principalement de feldspath, de quartz et de mica, et à laquelle appartiennent les granits compactes ou lamelleux, les gneiss, etc.

La roche arénacée, où se trouvent les grès et les grauwacke.

5e CLASSE. Pierres diverses, volcaniques et talqueuses.

Parmi les pierres présumées volcaniques sont les basaltes, les laves, les pozzolanes; l'amphibole et le pyrogène, le grünstein des Allemands, le trapp suédois. Ces pierres sont fusibles à une température très-élevée, et contiennent beaucoup d'oxides métalliques combinés diversement avec la silice, la chaux et d'autres terres.

Les pierres talqueuses sont des roches silicéo-magnésiennes, généralement infusibles; la serpentine en est une variété.

Telle est la classification générale des pierres adoptée par les ingénieurs; mais dans les travaux on ne considère les pierres que sous des rapports plus faciles à observer; tels que leur résistance, leur dureté, leur adhésion aux divers mortiers, et leur inaltérabilité. La grandeur et l'échantillon des blocs produisent encore, dans chaque espèce, des subdivisions, en pierres de taille de sujétion et ordinaires, en libages, en moellons de sujétion, susceptibles d'être essemillés ou piqués, et moellons ordinaires, enfin en menus fragments destinés aux maçonneries en béton, et aux empierrements des voies de communication.

*Pierres considérées pour leur emploi dans les constructions.*

1re CLASSE. Pierres argileuses.

Cette espèce de pierres, qui se trouve dans les gisements voisins des granits, présente une résistance et une dureté variable entre des limites très-distantes. Son adhésion aux mortiers est assez grande quand les faces de la pierre n'ont pas un poli naturel qui se trouve quelquefois dans les couches stratifiées des carrières. Les pierres argileuses sont généralement altérables à l'air et à l'eau, soit par la transformation de leurs sulfures en sels métalliques, soit par le ramollissement des molécules argileuses.

Cette circonstance commande beaucoup de circonspection dans leur emploi aux constructions, bien que ces pierres y soient souvent appropriées par leurs grandes surfaces et leurs faibles hauteurs. Elles ne conviennent, lorsqu'elles sont attaquables par l'air et l'eau, qu'aux constructions intérieures des ouvrages, ou lorsqu'elles sont soustraites, par des enduits, aux vicissitudes atmosphériques.

Les ardoises appartiennent à cette classe : elles sont employées dans beaucoup de parties de l'Europe à la couverture des bâtiments, à raison de leur légèreté comparative à celle des tuiles, de leur facile réparation et de leur durée, qui va quelquefois jusqu'à cent ans.

Les caractères extérieurs d'une bonne ardoise sont : sa légèreté, sa sonorité, sa dureté et son uniformité d'épaisseur. Ses dimensions superficielles varient depuis $0^{m. ca.},10$ jusqu'à $0^{m. ca.},30$.

On verra à l'article ciments que les schystes torréfiés peuvent rendre les mortiers hydrauliques.

Cette classe de pierres, très-répandue dans toute la France, est aussi celle dont l'usage est le plus fréquent et le plus varié; car elle présente toutes les nuances de ténacité, depuis celle de la marne friable et de la craie, jusqu'à celle des marbres antiques les plus durs. Son adhésion aux mortiers dépend de sa porosité et du poli de ses surfaces. Sa durée est très-précaire dans quelques variétés; et presque indéfinie à l'air et à l'eau dans d'autres variétés; mais toutes sont décomposables à un feu plus ou moins violent. 2e classe. Pierres calcaires.

Les pierres calcaires tendres absorbent l'humidité extérieure, et celle-ci, dans les gelées, détruit l'adhésion des molécules entre elles et détermine des écailles à la surface extérieure.

Les pierres calcaires sont généralement d'une extraction et d'une taille faciles. Elles sont toutes susceptibles de former de la chaux plus ou moins pure, dont l'affinité pour l'eau et les autres propriétés présentent les plus grandes variétés.

On s'en sert en menus fragments, particulièrement pour les couches inférieures des empierrements des voies de communication.

Enfin, sous le rapport de la grandeur des blocs, les pierres calcaires fournissent, suivant les carrières, toutes les ressources que réclament les travaux, à raison de leur gisement par bancs d'une grande étendue, et d'une hauteur variable.

A Paris, les pierres calcaires pour la bâtisse se distinguent en dures et tendres. Celles que les ouvriers nomment dures ne peuvent se débiter qu'au moyen de la scie à l'eau et au grès; tels sont les marbres communs, les liais et le cliquart, qui se trouvent dans quelques-uns des bancs des carrières de Paris.

Les pierres calcaires nommées tendres sont celles qui peuvent se débiter avec la scie à dents. Les pierres de Conflans et de Saint-Leu,

que l'on emploie fréquemment à Paris, appartiennent à cette catégorie.

Le marbre est plus particulièrement destiné à la décoration des édifices par le beau poli qu'il peut recevoir. On distingue particulièrement :

1° Le marbre blanc, réservé à la statuaire, tel que ceux de Paros et de Carrare;

2° Le marbre brèche : c'est un composé de fragments anguleux, unis par un ciment calcaire;

3° Le marbre pouddingue, qui est une aggrégation de petits fragments arrondis, unis par un ciment calcaire;

4° La pierre de Florence, qui présente des figures de végétaux ou des apparences de ruines d'édifices;

5° Le marbre lumachelle, qui est un amas de coquilles, réunies aussi par un ciment calcaire.

La plupart des départements de la France fournissent des marbres analogues à ces principales variétés. On distingue surtout ceux des Pyrénées, dont quelques variétés surpassent en beauté ceux d'Italie et même les marbres antiques.

3e classe. Pierres gypseuses.

Ces pierres, à raison de leur nature généralement friable et déliquescente et de leur altérabilité par le feu, ne sont guère employées dans les constructions que pour en retirer le plâtre. Elles sont en grande abondance aux alentours de Paris. Comme le sulfate calcaire s'y trouve combiné avec le carbonate, on obtient dans la cuisson une combinaison de plâtre et de chaux, qui fait préférer, pour la durée, le plâtre de Paris aux plâtres d'autres contrées.

L'albâtre, à cause de sa rareté, n'est guère employé que par la statuaire.

4e classe. Pierres scintillantes. Porphyres et granits.

Ces pierres présentent généralement une grande dureté et opposent une grande résistance aux pressions, mais elles éclatent souvent sous le choc avec une grande facilité. Leur contexture est aussi quelquefois hétérogène, et divisée par des fils intérieurs qui s'ouvrent dans le travail de ces pierres. Leur adhésion aux mortiers n'est pas grande; généralement elles sont inaltérables à l'air et à l'eau ; cependant, quand le feldspath y est très-prédominant, elles peuvent s'amollir et se détruire par une longue immersion dans l'eau.

Un feu très-violent en désaggrège les molécules.

Ces pierres sont très-coûteuses dans leur extraction et leur taille. Cette main-d'œuvre ne s'opère que par le choc d'outils acérés de diverses formes,

à tête, à pointe ou en coin; quand il s'agit de les fendre, l'on a recours ou à la mine, ou à la force du gonflement de coins en bois sec, qu'on mouille après les avoir engagés avec force dans un sillon pratiqué à la surface de la pierre.

Le granit dur est celui où le quartz prédomine. La roche qui le fournit se trouve par grandes masses, ou engagé par veines ou filons au milieu du schiste granitique, nommé gneiss; ou même en blocs isolés et épars.

Le granit dur convient à la construction des ouvrages hydrauliques, surtout de ceux qui sont exposés à l'atmosphère humide et saline des bords de la mer, aux frottements des vagues, des galets et autres alluvions. Ainsi le mur d'enceinte à la mer du port du Havre est construit en granit dur, jusqu'à la hauteur où les effets des alluvions appelés galets se font sentir.

La plupart de nos départements fournissent du granit dur; les côtes de l'Océan, depuis Cherbourg jusqu'à la Loire, en sont abondamment pourvues; l'on en trouve dans les Vosges et dans les montagnes de Bourgogne et de l'Auvergne.

Les anciens employaient souvent le granit. Les plus belles colonnes, les obélisques que les Romains avaient transportés de l'Egypte à Rome, sont de l'espèce de granit dur, connu sous le nom de granit oriental.

Le granit tendre, qui dans quelques départements, porte le nom de *grison*, ne contient que fort peu de quartz. Il se taille facilement; mais comme il est friable, il conserve mal ses arêtes et ne forme pas de belles constructions.

Le porphyre, les brèches et les pouddings ne s'emploient presque jamais comme pierres de taille. Leur rareté rend ces substances très-précieuses, et leur dureté ne permet de les mettre en œuvre que pour en former des ornements intérieurs, tels que des colonnettes, vases, chambranles de cheminées.

Pierres meulières.

La pierre meulière est aussi une pierre silicieuse, ou quartz-silex, très-irrégulière dans sa pâte et sa cassure, mais inaltérable à l'air, à l'eau, à la gelée, et généralement au feu.

On en distingue deux espèces : l'une qui se trouve par bancs et en grandes masses, et qui est propre à faire des meules de moulin d'un seul bloc; l'autre, qui est en fragments isolés et épars : l'on en forme également des meules de moulins, en les assemblant avec du plâtre et des cercles de fer. On emploie aussi cette deuxième espèce de meulière en moellon; il en résulte une excellente maçonnerie, parce que le mortier se loge dans les

nombreuses cavités de cette pierre, avec laquelle il a d'ailleurs beaucoup d'adhésion.

Grès et grauwacke. Les grès sont formés de petits grains de quartz plus ou moins atténués, et réunis par un ciment siliceux, alumineux, et quelquefois calcaire. Cette espèce de pierre se trouve rarement en couches continues, mais bien en masses irrégulières isolées, et souvent à la surface de la terre.

Les grès présentent divers degrés de dureté et de résistance; leur adhésion aux mortiers est généralement très-faible; ils résistent à l'air et à la gelée; mais quelquefois ils s'amollissent par leur immersion prolôngée dans l'eau; ils résistent assez bien au feu.

Les dimensions du grès sont généralement faibles; cependant le grès rouge des Vosges a fourni des matériaux de construction à plusieurs grands édifices publics et privés.

On se sert du grès dur pour le pavage des rues de Paris et d'autres villes de France : quand il est d'une dureté homogène, on l'emploie comme pierre de taille.

Le grès tendre fournit des meules à aiguiser, et des pierres à filtrer.

La grauwacke est une roche arénacée qui appartient aux terrains de transition. Quelquefois elle est en galets formant un poudding par leur réunion; quelquefois aussi l'abondance du mica lui donne une structure schisteuse, et alors elle passe, par degrés insensibles, à l'état de schiste argileux.

Elle n'est guère employée qu'à former des ciments artificiels.

5e classe. Pierres diverses. Les basaltes et autres pierres volcaniques présentent une très-grande dureté et une résistance énorme, mais se lient mal aux mortiers à raison de leur poli. Elles sont inaltérables à l'air, à l'eau et à la gelée; mais elles sont fusibles à un feu violent.

Elles sont peu employées dans les constructions à raison de la difficulté de leur mise en œuvre.

Les pierres talqueuses ne conviennent pas généralement aux constructions à raison de leur friabilité.

*Considérations générales et particulières sur la résistance des pierres des diverses classes.*

De nombreuses expériences ont été faites, entre autres par Rondelet, pour connaître la résistance des diverses pierres à l'écrasement et aux

tractions longitudinales; et ont fait connaître que dans les pierres de même dénomination, les efforts à exercer pour arriver à un effet déterminé, variaient plus que du simple au triple, et étaient d'autant plus grands, que la contexture était plus compacte, que le grain était plus fin et plus homogène, que la pesanteur spécifique était plus grande, et que la dimension en hauteur s'éloignait moins des dimensions de la base.

Les pierres commencent à éclater et à se fendre sous une charge, dont le rapport avec celle qui produirait l'écrasement varie, et qui n'est généralement pas au-dessus du tiers de cette dernière. L'on a remarqué au reste que la permanence de la charge en augmentait de beaucoup les effets.

En superposant plusieurs cubes, on a reconnu aussi qu'il fallait une bien moindre force pour les écraser, que si le cube total avait été d'un seul morceau.

L'on a cherché aussi à déterminer si la force de résistance des pierres par unité superficielle augmentait en raison de la superficie de leur base; et si la forme différente de ces bases influait surcette force. Des expériences, faites avec le plus grand soin, ont établi que dans des pierres de même nature et de même forme de base, la résistance par unité superficielle était toujours la même; et qu'à superficie égale, les pierres de même nature, dont la base est un parallélogramme rectangulaire, commencent à se fendre sous un moindre poids que celles dont la base est un carré; enfin que les pierres à base circulaire offraient le maximum de résistance. Les rapports de ces résistances étaient 703 pour la base rectangulaire, 806 pour la base carrée, et 917 pour la base circulaire.

L'on a remarqué en outre que quand les pierres se trouvent par bancs séparés dans les carrières, il importait, dans les constructions, de les placer dans la même situation qu'elles avaient dans le lit de carrière; c'est-à-dire de manière que les efforts qu'elles auront à supporter soient normaux aux plans de séparation des bancs de carrière. Les ouvriers intelligents se trompent rarement sur la véritable position de ce lit de carrière, et ils savent bien que toute pierre doit être, ainsi qu'ils le disent, posée sur son lit.

Résistances des diverses espèces de pierres.

On présente ci-dessous un tableau des résistances par unité superficielle de pierres de diverses espèces, au moment de l'écrasement ou de la rupture pour la traction longitudinale (on renvoie, pour plus de détails, aux ouvrages de Rondelet, à un mémoire de M Vicat, inséré aux *Annales*

*des ponts et chausseés de* 1833, et aux notes qui s'y rattachent, dans les mêmes *Annales* pour 1834).

| DÉNOMINATION DES PIERRES. | | PESANTEURS spécifiques, en prenant celle de l'eau pour unité. | | | RÉSISTANCE à l'écrasement par centimètre carré (des pierres cubiques). | | | RÉSISTANCE à la traction longitudinale. | | | OBSERVATIONS sur l'origine des chiffres. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Maximum. | Minimum. | Moyenne. | Maximum. | Minimum. | Moyenne. | Maximum. | Minimum. | Moyenne. | |
| | | | | | kilog. | kilog. | kilog. | kilog. | kilog. | kilog. | |
| 1re CLASSE. Pierres argileuses. | Pierre de pore ou puante. | | | 2,66 | | | 681 | | | | (x) Expériences de Rondelet (tome I de l'*Art de bâtir*), donnant des résultats trop forts. |
| | Pierre grise de Florence | | | 2,56 | | | 420 | | | | |
| 2e CLASSE. Pierres calcaires. | Marbres. | 2,726 | 2,60 | 2.65 | 788 | 308 | 548 | | | | |
| | Pierre de Portland en Angleterre. | 2,428 | 2,423 | 2,43 | 447 | 308 | (y) 377 | (z) 101 | (z) 29 | (z) 65 | |
| | Lias de Bagneux, roche de Châtillon, près Paris. | 2,44 | 2,08 | 2,28 | 444 | 133 | (x) 288 | | | | (y) Expériences de M. Rennie. |
| | Pierre de Saillancourt ou Conflans, pierres calcaires de Caen. | 2,41 | 1,82 | 2,16 | 141 | 56 | (x) 98 | (z) 23,81 | (z) 12,50 | (z) 18,00 | (z) Expériences de M. Sganzin, ingénieur des travaux maritimes (*Annales maritimes et coloniales* de 1830), donnant des résultats plutôt trop faibles que trop forts. |
| | Lambourde de Paris et tufeau de Nantes. | | | 1,56 | | | (x) 23 | (z) 7,43 | (z) 2,31 | (z) 4,80 | |
| 3e CLASSE. Pierres gypseuses. | Pierre à plâtre de Montmartre. | | | 1,92 | | | (x) 71,40 | | | | |
| | Pierre à plâtre venant de Rouen | | | | | | | (z) 23,83 | (z) 10,00 | (z) 15,44 | |
| 4e CLASSE. Pierres scintillantes. | Porphyre | | | 2,85 | 2607 | 1994 | 23,50 | 86 | 65 | 75,50 | |
| | Granits | (x)(y) 2,85 | (x)(y) 2,62 | (x)(y) 2,78 | (x)(y) 736 | (x)(y) 423 | (x)(y) 580 | (z) 64 | (z) 10 | (z) 37 | |
| | Schystes granitiques. | (y) 2,53 | (y) 2,31 | (y) 2,42 | (y) 462 | (y) 222 | (y) 342 | (z) 67 | (z) 9 | (z) 38 | |
| | Grès dur | (x) 2,52 | (x) 2,48 | (x) 2,50 | (x) 920 | (x) 813 | (x) 866 | | | | |
| | Gres tendre. | (x) 2,49 | (x) 2,40 | (x) 2,44 | (x) 77 | (x) 2,50 | (x) 40 | | | | |
| 5e CLASSE. Pierres volcaniques composées. | Basaltes | (x) 3,06 | (x) 2,88 | (x) 2,07 | (x) 2077 | (x) 1912 | (x) 1994 | (z) 71 | (z) 40 | (z) 55 | |
| | Laves. | (x) 2,60 | (x) 1,72 | (x) 2,16 | (x) 592 | (x) 160 | (x) 376 | (z) 39 | (z) 20 | (z) 30 | |
| | Scories de volcan et pierre ponce. | (x) 1,22 | (x) 0,60 | (x) 0,91 | (x) 58 | (x) 34 | (x) 46 | (z) 19 | (z) 3 | (z) 11 | |

Les différences énormes qui séparent le minimum du maximum de résistance pour des pierres de même dénomination, expliquent l'excès apparent de solidité des ouvrages de l'antiquité et du moyen âge.

On n'a point d'expériences qui fassent connaître la résistance des pierres, à des efforts parallèles au plan de rupture qui tendraient par conséquent à faire glisser une partie de la même pierre sur sa voisine.

Formules de résistance.

S'il s'agit de faire résister les pierres à un effort, P en kilogrammes perpendiculaire à leur longueur, on pourra se servir des formules suivantes,

où $a$ représente la largeur, $b$ la dimension dans le sens de l'effort, $l$ la longueur, R la résistance en kilogrammes à la traction par unité superficielle de même ordre que les dimensions $a$, $b$, $l$;

Si la pierre est encastrée à l'une de ses extrémités et chargée à l'autre on aura :

Suivant Galilée. . . . . . . . . $P = \frac{Rab^2}{2l}$. . . . . . . . (1),

Suivant Mariotte et Leibnitz. . $P = \frac{Rab^2}{3l}$. . . . . . . . (1),

Suivant M. Navier. . . . . . . . $P = \frac{Rab^2}{6l}$. . . . . . . . (1):

Si, dans les mêmes circonstances, la pierre est chargée uniformément sur sa longueur, les formules précédentes deviennent :

$$P = \frac{Rab^2}{l} \ldots\ldots (2),$$

$$P = \frac{2Rab^2}{3l} \ldots\ldots (2),$$

$$P = \frac{Rab^2}{3l} \ldots\ldots (2);$$

Si la pierre est posée sur deux appuis dont $l$ est la distance :

$$P = \frac{2ab^2}{l} \ldots\ldots (3),$$

$$P = \frac{4}{3}\frac{ab^2}{l} \ldots\ldots (3),$$

$$P = \frac{2}{3}\frac{ab^2}{l} \ldots\ldots (3);$$

Et si de plus la charge est uniformément répartie:

$$P = \frac{4ab^2}{l} \ldots\ldots (4),$$

$$P = \frac{8}{3}\frac{ab^2}{l} \ldots\ldots (4),$$

$$P = \frac{4}{3}\frac{ab^2}{l} \ldots\ldots (4);$$

Enfin si la pierre est encastrée à ses deux extrémités, et que la charge soit au milieu :

$$P = \frac{4ab^2}{l} \ldots\ldots (5),$$

$$P = \frac{8}{3}\frac{ab^2}{l} \ldots\ldots (5),$$

$$P = \frac{4}{3}\frac{ab^2}{l} \ldots\ldots (5);$$

Et si dans la même hypothèse, la charge est uniformément répartie :

$$P = \frac{8ab^2}{l} \ldots\ldots (6),$$

$$P = \frac{16}{3}\frac{ab^2}{l} \ldots\ldots (6),$$

$$P = \frac{8}{3}\frac{ab^2}{l} \ldots\ldots (6).$$

( On renvoie, pour plus de détails, à l'ouvrage de M. Navier, intitulé : *Résumé des leçons données à l'école des ponts et chaussées.* )

Il sera essentiel, toutes les fois qu'on fera une construction avec des matériaux tirés d'une carrière nouvelle, de refaire les épreuves de résistance, et de ne compter au plus, pour des charges permanentes, même en admettant que la pierre soit inaltérable sous l'action du temps, que sur la dixième partie de la résistance qu'on trouvera, soit à l'écrasement, soit à la rupture par traction. En effet, dans les édifices réputés les plus hardis, on a vérifié que ce rapport n'était pas dépassé. Il serait encore trop élevé, si la pierre était peu homogène, filandreuse; si la charge ne portait pas également sur toutes les parties de la pierre; et s'il y avait une grande disproportion entre les dimensions principales de la base, ou entre ces dimensions et la hauteur.

Lorsqu'il s'agit de matériaux déjà employés dans les localités, il est prudent de proportionner la charge permanente des nouvelles constructions aux maximum de charge par unité superficielle que les matériaux supportent dans les ouvrages existants.

Les épreuves au feu peuvent être faites dans les fours à chaux, feux de forges, fours à manche ou à réverbère.

Moyens de reconnaître la gélivité des pierres calcaires.

Enfin, lorsque la pierre est calcaire, on peut craindre sa gélivité. Si elle provient de bancs récemment mis en exploitation, il faut, avant sa mise en œuvre, tirer des blocs d'essai, les immerger pendant quelque temps sous l'eau, puis les exposer à l'air et les y laisser pendant l'hiver.

M. Brard a indiqué l'emploi chimique des sels solubles et cristallisables, et notamment des sels de soude, pour manifester la gélivité des pierres. Les sels, en se cristallisant dans les pores de la pierre, ont pour objet d'imiter l'action de la gelée.

Ce procédé, modifié par M. Héricart de Thury, consiste à faire bouillir des cubes d'essai de cinq centimètres de côté, sciés et non taillés, pendant une demi-heure, dans une solution de sulfate de soude saturée à froid ; à

les suspendre par des fils au-dessus de vases contenant une certaine quantité de la même dissolution saline, et dans une chambre dont la température est de 12 à 15°. Quand les cubes d'essai se couvrent d'efflorescences salines, on les trempe de nouveau dans la dissolution saline, puis on les laisse de nouveau à l'air ; et, après des alternatives d'efflorescences et d'immersions prolongées pendant cinq ou six jours, on sera fixé, par les fragments qui se seront détachés, sur la gélivité de la pierre.

M. Vicat, en recommençant les mêmes expériences, a reconnu que la seule dissolution de 1 d'eau avec 0,50 de sel, donne des résultats satisfaisants; et que l'action de la dissolution saline diminuait beaucoup, suivant le temps pendant lequel on faisait bouillir les échantillons.

(Voir les articles sur la gélivité des pierres, de MM. les ingénieurs en chef Vicat et Minard, insérés aux *Annales des ponts et chaussées* de 1832.)

---

## RÉSUMÉ DE LA DEUXIÈME LEÇON.

### SUITE DES MATÉRIAUX.

DU MOELLON. — DE LA BRIQUE. — DU PISÉ.

On désigne sous le nom de moellon la pierre de petit échantillon qui sert ordinairement à la construction de l'intérieur des maçonneries.

On l'emploie également quelquefois pour les parements des murs qui présentent peu d'importance sous le rapport de l'architecture.

La plupart des observations qui ont été faites sur les pierres de taille, relativement à leur résistance comparée à leur densité, sont applicables aux pierres considérées comme moellons.

Le moellon provient ordinairement des carrières d'où l'on tire la pierre de taille. On le prend dans les bancs qui ont peu d'épaisseur.

Les principales qualités du moellon sont d'être dur, bien gisant, et de résister à la gelée.

Quand le moellon brut est œuvré à la grosse pointe, de manière à avoir la même hauteur dans chaque rangée, il s'appelle moellon essemillé ou *smillé*.

Il est une autre espèce de moellon qui tient le milieu entre la pierre de taille et le moellon smillé; c'est celui qu'on nomme *moellon piqué*. Il est équarri et réduit à une hauteur uniforme : son parement est taillé à la

fine pointe. On l'emploie pour la construction des murs dont les parements exigent d'être soignés.

Les laves, les basaltes, les cailloux roulés, sont aussi employés comme moellons dans les localités où les pierres calcaires sont rares. Ces substances, quoiqu'en général moins bien gisantes que les moellons calcaires, forment cependant une bonne maçonnerie de remplissage.

### *De la Brique crue ou cuite et du Pisé.*

La brique est une espèce de pierre artificielle faite avec de l'argile pure ou mélangée, fusible ou infusible aux feux des fourneaux les plus ardents; dans ce dernier cas on la nomme aussi réfractaire.

Des briques crues. Les premières briques fabriquées par les anciens, étaient des masses d'argile, grossièrement façonnées, séchées à l'air et durcies au soleil.

Le temps et l'expérience ont appris successivement à mouler la brique; pour lui donner plus de consistance, on a mêlé à l'argile de la paille hachée; enfin, on est parvenu à lui donner une grande dureté, en soumettant les briques à l'action d'un feu violent.

L'emploi de la brique crue dans les constructions, remonte à la plus haute antiquité : on en trouve dans les ruines de l'ancienne Babylone. Des monuments égyptiens, quelques restes d'une pyramide, prouvent que la brique crue était d'un usage fréquent dans ces climats chauds, où elle acquérait une grande dureté.

Vitruve dit que les Grecs et les Romains l'employaient dans la plupart de leurs édifices, et cet auteur indique la manière dont ces briques crues étaient fabriquées.

Les meilleures étaient faites avec de l'argile blanche ou rouge, mêlée avec du sable.

Le temps le plus propre à la fabrication de la brique crue est le printemps ou l'automne, parce que la dessiccation s'opère plus également dans ces deux saisons. Les briques faites en été sèchent extérieurement trop vite, ce qui occasionne des gerçures lorsque l'humidité intérieure est obligée de briser cette enveloppe pour sortir. On était dans l'usage de n'employer cette brique que deux ans après sa fabrication.

Aujourd'hui la brique crue est peu en usage; on ne l'emploie que dans les constructions rurales, et dans les localités où le combustible est rare.

Le pisé est un mode de construction qui s'exécute avec de la terre; ce mode est analogue aux constructions en briques crues, mais beaucoup plus simple et plus économique. Du Pisé

Il est employé avec succès dans les départements du Rhône, de l'Ain et de l'Isère : on y bâtit en pisé les habitations dans les campagnes, les granges, et en général tous les bâtiments ruraux. Ce genre de construction est particulièrement convenable aux départements méridionaux : il réussirait moins bien dans ceux du Nord.

La fabrication du pisé exige une terre franche un peu graveleuse : les terres végétales sont, en général, propres à ce genre d'ouvrage.

La terre pour la fabrication du pisé, doit être passée à la claie : ordinairement l'humidité naturelle de la terre suffit pour qu'elle soit en état de pouvoir être employée, telle qu'elle sort de la fouille; si elle est trop sèche, on la mouille, mais légèrement et surtout bien également, jusqu'à ce qu'elle soit susceptible de faire corps en la serrant avec la main.

Les murs se construisent par parties, et au moyen d'un encaissement : on jette la terre dans cet encaissement formé par un châssis et des planches qui en font les parois : cette terre mise par couche de ( $0^m,081$ à $0^m,108$ ) 3 à 4 pouces d'épaisseur, est battue au pilon jusqu'à ce que les couches soient réduites à la moitié de leur épaisseur primitive. Le châssis a environ ( $3^m,25$ ) 10 pieds de long sur ( $0^m,98$ ) 3 pieds de haut, et une épaisseur de ( $0^m,55$ ) 20 pouces, pour un mur d'habitation ordinaire. Ainsi les blocs partiels de pisé, dont se compose un mur, ont ces dimensions : quand un bloc est achevé, on déplace le châssis, et on procède à la formation du bloc suivant, en ayant l'attention de tenir les parois des extrémités latérales des blocs inclinées d'environ 60 degrés, afin qu'ils forment liaison entre eux. Ces inclinaisons des joints montants doivent être en sens contraire, lorsqu'après avoir terminé une assise inférieure de blocs, on construit l'assise supérieure qui les recouvre.

Les jambages des portes et des croisées, les socles, les linteaux se font en pierres ou en briques.

Avant d'appliquer sur les murs en pisé l'enduit en chaux dont on est dans l'usage de les couvrir, et qui ajoute à leur solidité, il faut laisser écouler un laps de temps de six mois au moins, afin qu'ils soient entièrement secs.

Ces détails sur le pisé ne sont qu'une indication de cette méthode de

bâtir; mais on trouve dans les ouvrages de M. Cointereaux, professeur de constructions rurales, tous les détails nécessaires pour obtenir un succès complet dans ce genre économique de construction.

De la brique et autres objets en argile.

La brique cuite est celle qui a acquis un degré plus ou moins considérable de dureté par une plus ou moins longue exposition à l'action du feu.

Les Romains ont employé cette espèce de brique dans la plupart de leurs constructions; les murs du Panthéon d'Agrippa sont construits avec cette espèce de brique.

Il y en avait de deux sortes, les unes carrées, les autres triangulaires.

Les briques triangulaires étaient employées en parement, et l'espace parallélogrammique compris entre ces briques, dont deux correspondantes en parement formaient l'épaisseur du mur, était rempli en blocailles.

Les briques, carreaux et autres objets en argile cuite sont préparés sur une foule de formes et de dimensions différentes; tantôt ils sont prismatiques à base carrée, rectangulaire, losange, hexagonale, octogonale, circulaire et mixtiligne; tantôt ils sont œuvrés en claveaux de voûtes, et même en petites pierres d'appareil.

Les briques ordinaires pour murs et cloisons ont : de $0^m,20$ à $0^m,24$ de long; $0^m,10$ à $0^m,12$ de largeur, et 3, 4, 5 et 6 centim. d'épaisseur. Les grandes briques ordinaires font de $0^m,30$ et $0^m,36$ de longueur, de 15 et 18 centim. de largeur; avec des épaisseurs variables de 6 à 12 centim. Les longueurs et largeurs sont multiples l'une de l'autre et de l'épaisseur dans chaque espèce de briques.

La nature de la terre, le mode de moulage, le degré de retrait que l'argile est susceptible de prendre par la dessiccation et la cuisson, le mode de cuisson, règlent dans chaque circonstance les limites d'emploi, et les dimensions au maximum des objets à fabriquer.

Figures 1 des planches.

On a fait des briques creuses à l'imitation des poteries creuses, pour obtenir une cuisson homogène dans des volumes considérables, et le minimum de poids par volume extérieur. On s'est servi pour le moulage d'une machine imaginée et employée pour la première fois à Toulon, par M. Raucourt, actuellement ingénieur en chef des ponts et chaussées (voir la première collection lithographique de l'école des ponts et chaussées, dessin n° 174); mais la fabrication de ce genre de briques expose à beaucoup de déchets, les rend, à volume intérieur égal, bien plus chères que des briques pleines; en sorte qu'elles ne doivent être substituées à ces dernières que

dans les constructions où la légèreté est une condition essentielle à remplir.

La nature offre presque partout de l'argile fusible ordinaire propre à la fabrication de la brique ; si elle n'a pas la ductilité et le liant nécessaires, on y supplée par diverses additions de sable ou d'argile sablonneuse.

L'expérience détermine les quantités et les proportions de ces mélanges.

L'argile réfractaire est loin d'être aussi abondante que l'argile ordinaire. On la rencontre souvent dans les contrées où les roches sont feldspathiques, quartzeuses ou granitiques, et sont ou ont été en décomposition ou désaggrégation par l'action des vagues de l'eau salée ou douce. Le département de la Haute-Vienne et le canton de Forges en Normandie, sont très-riches en argile réfractaire. Il s'en trouve aussi sur les côtes maritimes du Morbihan, particulièrement près du port de Lorient.

Fabrication des briques et autres objets en argile.

Pour faciliter la préparation de la terre et la rendre propre à la fabrication de la brique, il faut extraire l'argile au mois de novembre, la laisser exposée à l'air pendant l'hiver, et ne l'employer que dans le printemps suivant. Les gelées et les pluies de l'hiver disposent la terre à être facilement corroyée. Il faut surtout avoir grand soin de purger la terre de toutes les substances pierreuses, pyriteuses et calcaires, qui s'y trouvent souvent mêlées ; car ces substances servent quelquefois de fondant à l'argile, ce qui occasionne une altération de forme aux briques, pendant qu'elles sont soumises à l'action du feu.

La terre corroyée avec soin et à plusieurs reprises, ajoute singulièrement à la densité et par conséquent à la bonté de la brique : la différence de densité entre deux briques crues, l'une corroyée avec soin, l'autre préparée à la manière ordinaire, est dans le rapport de 86 à 82.

De ces deux briques d'expérience, séchées également à l'air et dans les mêmes circonstances, et ayant ensuite éprouvé un semblable degré de feu, la première pesait 4 onces de plus que la brique ordinaire; l'une et l'autre avaient perdu à la cuisson, chacun 5 onces de leur poids.

Soumises à l'action d'une force qui s'exerçait sur chaque extrémité tandis que le milieu de la brique reposait sur un fer tranchant, la brique, faite avec la terre bien corroyée, n'avait rompu que sous une charge de $(31^{k},8)$ 65 livres, tandis que la brique ordinaire n'avait porté que $(17^{k},1)$ 35 livres; ce qui équivalait à $(63^{k},6)$ 130 livres pour la première, et 70 pour la seconde brique, en les supposant chargées au milieu.

La résistance des briques pleines est donc relative à leur densité. Ce résultat est analogue à celui que l'on a observé sur la résistance comparée des pierres de même espèce.

La résistance des briques aux forces qui tendent à les rompre au milieu, est non-seulement due aux soins qu'on a apportés à leur fabrication, mais encore à la qualité de la terre; en effet, les briques de Maubeuge, manipulées avec soin, mais suivant l'usage du pays, soumises à la même épreuve, ont supporté, avant de se rompre, une bien plus forte pression que celles de l'expérience précitée: elles ont porté ( 215k,4 ) 440 livres dans leur milieu, c'est-à-dire plus de trois fois la pression qui avait fait rompre la brique formée avec une terre d'une qualité inférieure à celle de Maubeuge, mais corroyée avec un soin particulier.

Le corroyage se fait avec des pelles en fer, des couperets et des rabots en même métal, ou avec des pilons. Il paraîtrait préférable de recourir aux machines employées pour le corroyage des mortiers.

On peut encore ajouter à la perfection de la brique, hâter sa dessiccation, et lui donner une densité plus considérable, en comprimant la brique crue sous un balancier. Ce procédé, d'après M. Gallon, auteur de plusieurs mémoires sur la fabrication des briques, était en usage à la briqueterie de Chaumont; il est imité de celui qui est suivi en Angleterre, où l'on frappe au balancier une espèce de faïence légère et cependant fort solide.

La quantité d'eau nécessaire pour délayer la terre doit être relative à l'espèce d'argile qu'on emploie. L'expérience seule peut déterminer cette quantité d'eau : en général, elle ne doit pas excéder un demi-hectolitre par hectolitre d'argile.

Si l'argile paraît trop grasse, susceptible de prendre un retrait considérable dans la dessiccation et la cuisson, l'on y ajoute du sable coloré ou blanc, suivant que l'argile elle-même est fusible ou infusible.

On façonne les briques ou autres objets à confectionner dans des moules en bois, ou en tôle de fer, dont les dimensions doivent excéder celles des briques ou objets, de tout le retrait que l'expérience aura fait connaître. Les briques ou objets façonnés, sont exposés pour la dessiccation, à l'ombre, sous des hangars, ou en plein air, au moyen de paillassons qui les mettent à l'abri du soleil; quand la pâte est devenue ferme, on rebat les briques pour régulariser leur forme. Peu de jours après on procède à leur cuisson.

Les soins qu'on apporte à la cuisson des briques contribuent aussi à la bonté de cette espèce de matériaux. Cuisson.

Cette opération a lieu au moyen de plusieurs sortes de combustibles; le bois, le charbon de terre et la tourbe. Chacune de ces espèces de combustibles exige des fours différents.

Les fours à briques, qu'on chauffe avec le bois, sont de deux espèces : les grands et les petits. Dans les deux, la brique et le combustible sont arrangés de la même manière; ils ne diffèrent que par la quantité de briques qu'ils peuvent contenir. Les grands fours en contiennent 100 milliers; les petits n'en reçoivent que 25 milliers. Figures 2 des planches.

Dans quelques-uns des départements du Nord, au lieu de bâtir des fours à demeure, et en maçonnerie de briques, on se contente de les construire en briques crues, ainsi que les voûtes du foyer où l'on place le combustible. Cette méthode économique est également en usage en Suède.

En Allemagne, le même four, alimenté par du bois résineux, sert à cuire la chaux et la brique; celle-ci se place dans la partie supérieure de la charge. Si l'on économise ainsi une partie de la chaleur perdue dans la calcination de la chaux, le tassement que subit cette dernière quand elle arrive au terme de l'opération, occasionne de grands déchets dans la brique. On a évité ce dernier inconvénient, dans la construction en 1828 de nouveaux fours au port militaire de Lorient, en plaçant un four à briques spécial au-dessus du four à chaux, et en réservant toutefois dans l'intervalle en hauteur qui les sépare, un foyer indépendant pour le four à briques. Ce second foyer donne le moyen de compléter la cuisson commencée avec la chaleur provenue d'abord du four à chaux inférieur. Figures 3 des planches.

Quelle que soit la construction des fours, les briques y sont arrangées en les posant de champ sur les longs côtés; de manière que le premier rang croise les languettes du foyer : le second rang croise le premier, et ainsi de suite, en laissant toujours un certain vide entre les briques. Le dernier rang est recouvert d'une couche d'argile de ($0^m,11$) 4 pouces d'épaisseur, afin de concentrer la chaleur et de pouvoir la modifier à volonté en y pratiquant des ouvertures.

La conduite du feu exige de l'expérience; l'on commence par un feu modéré, qui dure environ 24 heures. On l'augmente ensuite, et on le soutient 36 heures à ce degré. Après les premières 66 heures de feu, on l'augmente jusqu'à ce qu'il ait acquis la plus forte intensité, que l'on fait

durer le plus également qu'il est possible jusqu'à l'entière cuisson de la brique. On laisse refroidir la fournée, ce qui exige deux à trois semaines avant qu'on puisse sortir la brique du four.

Lorsqu'on emploie le charbon de terre, l'opération de la cuisson de la brique s'effectue ordinairement en plein air. La construction du fourneau et sa charge en briques crues se font simultanément : on commence à placer sur la plate-forme du foyer; une couche de charbon de terre, que l'on recouvre de trois ou quatre rangs de briques; puis un lit de charbon, et ainsi de suite en suivant le même ordre jusqu'à (6$^m$,50) 20 pieds de hauteur.

En Hollande, on cuit la brique au moyen de la tourbe. Les fours sont établis sous de vastes hangars, et on les construit dans le genre de ceux de la Belgique. Le combustible se place dans le foyer qui occupe toute la base du four.

Quelles que soient les espèces de four et de combustible qu'on emploie pour cuire la brique, la masse entière d'une fournée n'obtient pas le même degré de feu, et il en résulte nécessairement diverses qualités de briques. On les emploie aux différentes constructions auxquelles elles sont plus ou moins propres, relativement à leur dureté.

La résistance absolue à l'écrasement par centimètre carré, varie pour les briques peu cuites de 1 à 5 kil.; pour les briques moyennement cuites de 5 à 15 kil., et pour les briques très-cuites, elle peut aller jusqu'à 116 kil. M. l'Ingénieur des travaux maritimes, Sganzin (Théodore), dans des épreuves insérées aux *Annales maritimes et coloniales* de 1830, a trouvé pour résistance absolue à la traction par centimètre carré, 4 kil. pour des briques crues âgées de huit jours; et depuis 6$^k$,55 jusqu'à 16$^k$,56 pour des briques cuites. Tredgold a trouvé en Angleterre des résistances de traction variant depuis 19 jusqu'à 60 kil.

On reconnaît la bonté de la brique cuite, lorsqu'elle rend un son clair quand on la frappe, lorsque le grain est fin et serré dans la cassure, enfin lorsqu'elle résiste à la gelée et à l'intempérie des saisons.

La meilleure brique en usage à Paris, vient de Bourgogne : sa couleur ordinaire est d'un rouge-brun, il y en a d'un rouge jaunâtre. Ces deux espèces résistent au feu.

La brique bien choisie est d'un excellent usage dans la plupart des constructions. Elle remplace avec avantage le moellon, et supplée la

pierre de taille quand elle est rare. On l'emploie à la construction des voûtes légères : elle est nécessaire pour certaines espèces d'ouvrages, tels que les tuyaux et languettes de cheminées, pour les fours, les foyers et les fourneaux qui doivent supporter un haut degré de chaleur.

La plupart des écluses et des ouvrages hydrauliques de la Hollande sont exécutés, en grande partie, en maçonnerie de briques presque vitrifiée et émaillée. Ce genre de maçonnerie est excellent pour les ouvrages dans l'eau; et ces constructions, lorsqu'elles sont faites avec le soin et les précautions que l'on prend en Hollande, ne laissent rien à désirer, tant pour leur solidité que pour leur belle exécution.

Cet article de la brique sera terminé par quelques notions sur une espèce particulière de briques, nommées *briques flottantes*, qui, par leur grande légèreté, ont effectivement la propriété de surnager dans l'eau. Briques flottantes.

Il paraît que les anciens ont connu cette espèce de brique : on en a fabriqué dans le moyen âge, et l'on prétend qu'elles ont servi à la construction de la coupole du dôme de Sainte-Sophie, à Constantinople; mais la matière propre à la fabrication de cette espèce de brique étant rare ou peu connue en France, son emploi y est nul.

Le célèbre naturaliste Fabroni, directeur du musée de Florence, a essayé de fabriquer des briques légères avec une substance minérale, connue sous le nom d'*agaric minéral*, ou *farine fossile*. Cette espèce de terre est abondante en Toscane : elle est composée sur 100 parties, de

| | |
|---|---|
| Silice. . . . . . . . . . . . . . . | 55,0 |
| Magnésie. . . . . . . . . . . . . | 15,0 |
| Alumine. . . . . . . . . . . . . | 12,0 |
| Chaux . . . . . . . . . . . . . . | 3,0 |
| Fer . . . . . . . . . . . . . . . | 1,0 |
| Eau . . . . . . . . . . . . . . . | 14,0 |
| | 100,0 |

Quand on mouille cette substance, elle produit une légère fumée blanchâtre : elle ne fait pas effervescence avec les acides; infusible à la chaleur la plus forte, elle y perd $\frac{1}{8}$ de son poids, sans diminuer sensiblement de volume.

Les briques que Fabroni a fabriquées avec cette substance ont une pesanteur spécifique moindre que celle de l'eau. Elle s'unissent très-bien avec les différents mortiers : le froid ni la chaleur la plus forte ne les altèrent point.

Cette substance talqueuse est friable : pour diminuer la difficulté de fabrication et lui donner la ductilité nécessaire, Fabroni l'a mêlée avec environ $\frac{1}{5}$ d'argile. Cette addition d'une matière plus pesante que l'eau doit être telle, qu'elle n'ôte pas à ces briques la propriété de surnager dans ce fluide.

Une de ces briques, de (0$^{m}$,19) 7° de longueur, (0$^{m}$, 12) 4° $\frac{1}{2}$ de largeur, et (0$^{m}$,045) 1° 8 d'épaisseur, ne pesait que (0$^{k}$,13) 4 onces $\frac{1}{4}$. La brique ordinaire de Toscane, des mêmes dimensions, pèse (2$^{k}$,53) 5 livres 6 onces $\frac{3}{4}$.

La grande légèreté, l'infusibilité de cette brique, à la plus haute température, la rendent précieuse pour la construction des fours à réverbère. Elle est si mauvais conducteur du calorique, qu'on peut tenir une des extrémités entre ces doigts, tandis que l'autre est rouge de chaleur. On peut en faire des pièces pyrométriques, propres aux usages ordinaires, et bien moins dispendieuses que celles de Wedgewood.

Cette espèce de brique serait très-utilement employée pour la construction des cuisines à bord des vaisseaux : on pourrait également en construire les magasins d'huile, de suif, de goudron, et d'autres matières combustibles dans les arsenaux de la marine.

Feu M. Faujas, administrateur et professeur au Musée royal d'Histoire naturelle, a trouvé, dans le département de l'Ardèche, une substance semblable à celle avec laquelle Fabroni a fabriqué ses briques légères : il en a fait divers essais qui ont donné les mêmes résultats qu'en Toscane.

Désirant constater, par une expérience authentique et décisive leur grande utilité pour les maçonneries à bord des vaisseaux, M. Faujas a fait construire avec les briques de sa fabrication une chambre voûtée, dans un vieux navire : il l'a remplie de poudre de guerre ; et après l'avoir environnée et recouverte de matières combustibles, on a mis le feu au navire ; il a brûlé en entier jusqu'à la flottaison, il a coulé bas, et les poudres, préservées du feu par la maçonnerie de ces briques, n'ont pas fait d'explosion.

Il est à désirer qu'on utilise pour notre marine une découverte aussi précieuse (1).

---

## RÉSUMÉ DE LA TROISIÈME LEÇON.

DE LA CHAUX. — OPINION DES MODERNES SUR CETTE SUBSTANCE. — MODES DE FABRICATION ET D'EXTINCTION. — DES CHAUX ÉMINEMMENT HYDRAULIQUES, DÉNOMMÉES PLATRES-CIMENTS ET CIMENTS ROMAINS.

La chaux pure, telle qu'on la considère en chimie, est un oxide métallique (oxide de calcium), ayant toutes les propriétés alkalines. Elle est caustique et verdit fortement le sirop de violette; sa pesanteur spécifique est de 2,3 d'après Kirwan; elle est infusible, se combine avec l'eau, et forme ce qu'on appelle un *hydrate de chaux*. L'eau en dissout environ $\frac{1}{400}$ de son poids, et alors s'appelle *eau de chaux*. La chaux attire fortement l'acide carbonique contenu dans l'air, et repasse à l'état de carbonate de chaux; en sorte que pour la conserver, il faut la renfermer dans des vases bien bouchés.

La chaux pure peut s'obtenir par la calcination du marbre blanc, qui, sur 100 parties en poids, contient 64 de chaux, 33 d'acide carbonique et 3 d'eau. Sortant du four, la chaux s'appelle *chaux vive*; dans cet état elle a une grande avidité pour l'eau, l'enlève à l'air et augmente de volume en s'en emparant. Si l'on jette une certaine quantité d'eau sur de la chaux vive, elle s'échauffe fortement de manière à déterminer des accidents graves si l'on ne se tient en garde, se fond avec bruit, et une partie de l'eau s'évapore en entraînant avec elle quelques parties de chaux. La chaux dans ce second état est appelée *chaux éteinte*.

La chaux, telle qu'on la considère dans les arts, est le résultat de la décomposition plus ou moins complète par le feu de la pierre calcaire. Mais

---

(1) On renvoie, pour plus de détails, aux ouvrages publiés par MM. Hassenfratz et Clère, Inspecteurs divisionnaires et Ingénieurs en chef des mines; par M. Raucourt, Ingénieur en chef des ponts et chaussées, et particulièrement au mémoire de M. Petot, Ingénieur des ponts et chaussées, intitulé *Recherches sur la chauffournerie*, et aux articles y relatifs insérés par M. l'Ingénieur Mangeot dans les *Annales des ponts et chaussées*.

dans cette pierre la chaux se trouve combinée, à diverses proportions, avec l'acide carbonique et même l'acide sulfurique, avec l'argile formée de silice et alumine, avec la magnésie et les oxides de fer et de manganèse, auxquels les pierres calcaires doivent en partie leur coloration.

Les propriétés de la chaux qu'on obtient ainsi sont très-variées, et n'ont été bien explorées que depuis une vingtaine d'années.

Ancienne classification des chaux.

On ne distinguait naguères que deux espèces de chaux, la *chaux grasse* et la *chaux maigre*.

La première avait été ainsi dénommée, parce que, éteinte avec de l'eau au sortir des fours, elle augmentait considérablement de volume, ou foisonnait beaucoup en se réduisant en pâte; ce foisonnement est tel, qu'une partie de chaux grasse vive, mesurée en volume, en produit quelquefois plus de trois en pâte.

La chaux maigre ne manifestait pas la même avidité pour l'eau, et augmentait beaucoup moins de volume.

Il en résultait que cette dernière était souvent repoussée des travaux comme moins économique. Cependant, l'on avait remarqué que beaucoup de chaux maigres avaient la propriété de durcir sous l'eau, sans mélange d'aucun ingrédient et entre autres, en France, les célèbres chaux de Senonche et la chaux des environs de Metz. Mais on attribuait cet effet aux oxides de fer et de manganèse, et, par une réciproque qui était erronée, on avait pensé que toutes les chaux maigres avaient égalcment la propriété de durcir sous l'eau.

C'est à M. Vicat, ingénieur en chef des ponts et chaussées, que l'on doit la publication des nouvelles théories aujourd'hui généralement accréditées sur les chaux, les ciments et les mortiers. MM. Treussart, maréchal de camp du génie; Berthier, ingénieur en chef des mines; Petot, ingénieur des travaux maritimes, et une foule d'officiers de tous les services publics et de savants étrangers, sont entrés dans la route ouverte par M. Vicat; et c'est dans leurs ouvrages et dans ceux de M. Vicat; dans les publications du Journal des mines, des Annales des ponts et chaussées, des Annales maritimes; dans le Mémorial du génie, les Bulletins de la société d'encouragement, qu'il faut aller étudier des questions qui ont la plus grande importance pour la solidité et la durée des ouvrages d'art. On se bornera ici à indiquer les principes sommaires qui découlent de ces études multipliées.

Nouvelle classification des chaux.

Les chaux sont classées aujourd'hui en chaux *communes*, qui peuvent être grasses ou maigres, et qui n'ont point par elles-mêmes la propriété de

durcir sous l'eau; et en chaux *hydrauliques*, qui jouissent de cette propriété et qui sont toutes des chaux maigres.

L'hydraulicité des chaux peut tenir tantôt à leur décomposition incomplète ou à leur surcalcination, et tantôt aux proportions de leurs divers éléments.

Ainsi, des chaux qui, complétement calcinées et isolées de l'acide carbonique, seraient peu hydrauliques, peuvent le devenir à un degré marqué, si leur décomposition est incomplète, et qu'une partie reste à l'état de sous-carbonate.

Des chaux peu hydrauliques surcalcinées acquièrent cette même propriété (voir les recherches sur la chauffournerie, de M. Petot).

Quant aux chaux naturellement hydrauliques, ce n'est point à l'oxide de fer ni à celui de manganèse qu'elles doivent cette propriété, ni à l'alumine seule, ni à la magnésie, mais à l'argile qui se trouve dans la pierre calcaire, c'est-à-dire à un composé de silice et d'alumine.

Les oxides métalliques ou alkalis mentionnés ci-dessus, et auxquels Bergmann et Guyton de Morveau attribuaient l'hydraulicité de certaines chaux maigres, ne paraissent avoir d'autre effet que de rendre maigres des chaux qui seraient grasses.

En suivant les variations des proportions relatives d'argile siliceuse et de chaux dans les chaux du commerce, on a été conduit à une classification qui lie les chaux par une seule loi de continuité, aux diverses pozzolanes et trass.

M. l'ingénieur Petot, dans ses Recherches sur la chauffournerie, présente le tableau suivant :

| PROPORTIONS EN POIDS. | | PRODUITS RÉSULTANTS. | CARACTÈRES DISTINCTIFS DES PRODUITS. |
|---|---|---|---|
| Chaux. | Argile. | | |
| 100 | 0 | Chaux très-grasse. | Incapable de durcir sous l'eau. |
| 90 | 10 | Chaux un peu hydraulique. | Pouvant fuser comme la chaux pure, au terme de calcination ordinaire, et de plus durcir sous l'eau. |
| 80 | 20 | Chaux bien hydraulique. | |
| 70 | 30 | *Id.* | |
| 60 | 40 | Plâtre ciment. | Ne pouvant fuser, quel que soit le degré de calcination, mais pouvant se solidifier seuls sous l'eau. |
| 50 | 50 | *Id.* | |
| 40 | 60 | *Id.* | |
| 30 | 70 | Pozzolane calcaire (suivant M. Bruyère). | Ne pouvant se solidifier sous l'eau sans addition de chaux grasse ou hydraulique. |
| 20 | 80 | *Id.* | |
| 10 | 90 | *Id.* | |
| 0 | 100 | Pozzolane d'argile pure. | *Id.* |

Les argiles, combinées avec la chaux, varient elles-mêmes dans leur composition.

Ainsi, la pierre calcaire qui donne la chaux hydraulique de Metz analysée a donné :

| | |
|---|---|
| Acide carbonique. . . . . . | 39,00 |
| Chaux. . . . . . . . . . . . . | 44,50 |
| Silice. . . . . . . . . . . . | 5,24 |
| Alumine . . . . . . . . . . . | 1,25 |
| Manganèse . . . . . . . . . . | 3,50 |
| Oxide de fer . . . . . . . . . | 3,20 |
| Eau . . . . . . . . . . . . . | 2,25 |
| Perte. . . . . . . . . . . . | 1,05 |
| | 100,00 |

La pierre à chaux de Sainte-Catherine, près Rouen, a donné :

| | |
|---|---|
| Carbonate de chaux. . . . . . | 68 |
| Alumine. . . . . . . . . . . . | 12 |
| Sable . . . . . . . . . . . . . | 6 |
| Oxide de fer. . . . . . . . . . | 2 |
| Eau . . . . . . . . . . . . . . | 12 |
| | 100 |

La chaux hydraulique de Senonches, analysée par M. Berthier, a donné :

70 de chaux pure,
1 de magnésie,
29 de silice,

100 : il ne s'y trouve pas d'alumine.

M. Treussart relate dans son mémoire de nombreuses analyses d'argiles d'Alsace.

Il serait très-intéressant de reconnaître par des caractères extérieurs faciles à saisir, quels sont les calcaires susceptibles de donner des chaux hydrauliques ; mais ni le gisement, ni la couleur, ni la cassure, ni la dureté, ne sont des indices suffisants ; et souvent dans la même carrière, dans les mêmes gisements, dans les mêmes bancs, se trouvent réunis des calcaires susceptibles de donner par la calcination depuis la chaux peu hydraulique jusqu'à celle qu'on a appelée improprement *plâtre-ciment*.

Il faut donc dans chaque localité, faire des essais, des analyses chimiques

pour reconnaître la présence de la chaux hydraulique. Ces essais doivent être faits à divers degrés de calcination et à l'air, car le même degré de calcination ne convient pas aux différents calcaires.

Moyens de reconnaître l'hydraulicité des chaux

Pour constater l'hydraulicité de la chaux, le moyen le plus simple est celui qui a été indiqué par M. Vicat. Il consiste à prendre de la chaux vive sortant du four, à la réduire en pâte épaisse avec de l'eau, et à la placer au fond d'un vase, en l'étendant et en n'en mettant que jusqu'au tiers ou jusqu'à la moitié du vase; 3 ou 4 heures après on versera de l'eau sur cette chaux jusqu'à remplir le vase, et on laissera reposer le tout; au bout de 2 ou 3 jours on touchera légèrement cette chaux avec le doigt pour voir si elle commence à prendre un peu de fermeté. Si elle est hydraulique, elle aura au bout de huit à dix jours une consistance telle, qu'en la pressant fortement avec le pouce on ne fera aucune impression sur la chaux. On s'assurera du fait en rejetant l'eau supérieure à la surface de la chaux. Si l'on n'obtient le résultat précédent qu'au bout de 20, 30 ou 40 jours, la chaux sera faiblement hydraulique. Enfin, si au bout de ce temps elle n'a pris aucune consistance, c'est qu'elle est commune.

Fabrication des chaux hydrauliques artificielles.

La rareté des chaux hydrauliques naturelles, les variations énormes qui se trouvent dans les carrières calcaires, ont dû conduire à les composer artificiellement par synthèse avec de la chaux commune et avec les proportions convenables d'argile.

M. Vicat a indiqué deux procédés :

Le premier consiste à mélanger intimement le calcaire même, qui aurait donné la chaux commune, avec l'argile (à proportions convenables de silice et d'alumine), et à les cuire ensemble dans les fours ordinaires.

Ce procédé n'est applicable qu'aux calcaires friables, tels que les marnes, les craies, les coquillages et madrépores, parce qu'il faut triturer d'abord le calcaire, et que cette opération peut être plus dispendieuse que sa cuisson.

Le second consiste à laisser se réduire spontanément en poudre fine, dans un endroit sec et couvert, la chaux que l'on veut modifier; puis à la corroyer avec un peu d'eau et une certaine quantité d'argile grise ou brune, ou simplement de la terre à brique; et à tirer de cette pâte des boules, qu'on laisse sécher pour les faire cuire ensuite au degré convenable.

Les chaux communes grasses, dit M. Vicat, peuvent comporter 0,20

d'argile, en poids pour 100; pour les chaux maigres il suffit de 0,15; et même 0,06 suffiraient déjà pour celles qui ont quelques qualités hydrauliques. Lorsqu'on pousse la dose jusqu'à 0,33, la chaux ne fond point; mais elle se pulvérise facilement, et donne, lorsqu'on la détrempe, une pâte qui prend corps sous l'eau très-promptement.

Selon M. Treussart, on peut augmenter la bonté des chaux hydrauliques artificielles, en mélangeant avec l'argile une petite quantité d'eau chargée de soude, ou mieux encore de potasse.

La fabrication des chaux hydrauliques, suivant le premier procédé de M. Vicat, a été établie en grand sur différents points, et notamment à Meudon, par M. Saint-Leger. La craie de Meudon est mélangée avec 0,2 d'argile de Vanvres, laquelle présente 0,63 silice, alumine 0,282, oxide de fer 0,068. Le mètre cube de cette chaux s'est vendu, à Paris, de 70 à 74 francs, en 1829.

Enfin, on rappelle qu'on peut rendre très-hydrauliques des chaux qui le seraient peu par elles-mêmes, soit en calcinant incomplétement, soit en surcalcinant les calcaires qui les contiennent.

MM. Treussart et Petot ont prouvé : que les chaux hydrauliques naturelles et artificielles s'altéraient rapidement par leur contact avec l'air; qu'il est impossible de prévenir cet effet; et que ces chaux finissaient par passer à l'état de chaux commune *maigre*.

Il est possible que, par une nouvelle calcination et *à l'instar* des plâtres ciments, dont M. Petot a obtenu la revivification, on puisse rendre à quelques-unes d'entre elles leurs qualités hydrauliques.

Cuisson des pierres à chaux

Le mode de décomposition par le feu des pierres calcaires et de fabrication des chaux naturellement ou artificiellement hydrauliques, dépend de la quantité de matière qu'on veut obtenir à chaque fois, de la nature de la chaux, de celle du combustible, de la grosseur et de la dureté des fragments calcaires à décomposer.

On trouve à cet égard beaucoup de détails pratiques dans un ouvrage de M. Hassenfratz, inspecteur divisionnaire des mines, dans le mémoire de M. Treussart, et particulièrement dans les Recherches sur la chaufournerie de M. Petot, ingénieur des travaux maritimes.

Ce dernier a expérimenté que dans quelques minutes, avec des plaques de tôles placées dans une petite forge, sur un feu de charbon de bois, l'on pouvait obtenir, pour la décomposition des pierres calcaires, les mêmes résultats que dans un four ordinaire, après plusieurs jours de chauffage.

Des creusets placés au milieu d'un feu de charbon produisent des effets analogues, mais moins homogènes.

Le fourneau à réverbère que M. Petot a établi à Brest sert également à la torréfaction des ciments, et à la calcination de la chaux, quand elle n'exige pas une température trop élevée.

Les chaux hydrauliques naturelles ou artificielles étant susceptibles de se vitrifier par la présence d'une quantité plus ou moins grande de silice, M. Treussart annonce qu'il est très-difficile de les cuire au degré convenable, attendu qu'elles s'éteignent mal si elles ne sont pas assez cuites; et que trop cuites elles s'éteignent lentement, quelquefois longtemps après l'emploi dans les maçonneries, des mortiers où elles entrent; et qu'elles peuvent occasionner ainsi des avaries considérables dans les travaux.

Le combustible employé pour la cuisson peut être du bois, du charbon de terre ou de bois, et de la tourbe.

Enfin, certaines pierres calcaires, telles que les marbres purs et impurs, ont une grosseur et une dureté telles, qu'il en coûterait beaucoup pour les réduire en fragments menus, et ne peuvent être cuits que dans certaines espèces de fours.

Il faut donc, dans chaque localité, déterminer les conditions à remplir, et se régler d'après cela pour le mode de chauffage.

En Alsace on calcine la chaux dans de grands fours carrés et très-élevés; le calcaire se place au bas du four; on met des briques par-dessus la chaux et des tuiles par-dessus les briques, et l'on chauffe avec du bois, qui est placé dans le bas.

Dans les pays à houille on se sert de fours en cône renversé ayant de $2^m,60$ à $3^m,25$ de hauteur, et $2^m$ à $2^m,30$ de diamètre, à la base, avec une ouverture dans le bas pour allumer le feu et retirer le produit de la calcination. On charge ces sortes de fours, en mettant des couches alternatives de combustible (houille ou tourbe) et de calcaire en menus fragments. Lorsque les matières du bas du four sont cuites, on les retire au fur et à mesure, et l'on ajoute de nouvelles couches alternatives par le haut. De cette manière la calcination est continue, et l'on obtient telle quantité de chaux que l'on veut. Figures 4 des planches.

Les fours employés habituellement lorsque le calcaire est en gros fragments, et qu'on se sert du bois pour combustible, sont des fours à surface de révolution, dont la courbe génératrice est une sorte de demi-ellipse allongée en forme de *poire*. Ces fours ont jusqu'à 6 à $7^m$ de hauteur, $3^m$ à Figures 4 des planches.

3m,60 de diamètre maximum, et un col au sommet de 0m,60 à 0m,90 de diamètre; ils peuvent cuire à la fois de 30 à 45m cubes de chaux.

Dans ces fours, dont les parois ont près de 2m d'épaisseur, et qui n'ont ni foyer intérieur ni grille, le bois brûle debout; la même ouverture latérale, de 0m,60 à 0m,80 de largeur sur 1m,70 de hauteur, sert à l'introduction de l'air et du combustible. Le calcaire à cuire forme les parois mêmes du foyer, ainsi que la voûte ogive qui le couvre, et qui a 2m à 2m,50 de hauteur sous clef. Ces parois et cette voûte sont établis par les chaufourniers eux-mêmes; ils rechargent au-dessus les pierres calcaires par couches horizontales, en ayant soin de placer les plus gros blocs dans les couches inférieures, en surface annulaire autour de l'axe, et de réserver les menus, 1° pour les parties de chaque couche adjacentes aux parois; 2° pour les couches supérieures. La durée de la calcination varie de 106 à 126heur., et emploie depuis 945 jusqu'à 1240kil. de combustible en fagots ou bois par mètre cube de pierres.

Les chaufourniers considèrent la calcination comme terminée, lorsqu'il s'élève au-dessus du four un cône de feu vif sans mélange de fumée; lorsque toute la masse de la charge a éprouvé un tassement brusque et considérable; enfin lorsque les pierres ont changé de couleur.

Figures 4 des planches.

Une quantité considérable de chaleur étant perdue dans la calcination de la chaux, M. Petot a été conduit à projeter deux étages de fours à chaux, chacun avec un foyer particulier; et il a obtenu à la fois une réduction considérable de temps et de combustible pour la calcination du calcaire de Brest.

Ainsi qu'on l'a déjà dit, au port de Lorient, dès 1828, on avait également pensé à économiser une partie de cette chaleur, en établissant au-dessus des fours à chaux des fours à briques, ayant leur foyer séparé et pouvant ainsi fonctionner isolément.

L'emploi de la vapeur d'eau avait été préconisé pour hâter le dégagement de l'acide carbonique. Les expériences de M. Petot ont prouvé, au moins pour les calcaires de Brest, et pour le procédé de calcination de ce port, que la vapeur d'eau ne présentait d'autres avantages que d'empêcher la surcalcination des pierres calcaires placées près du foyer, et de conserver les cendriers ou grilles en fer dans les foyers améliorés par M. Petot.

Au reste, c'est dans l'ouvrage de cet ingénieur qu'il faut chercher tous les éléments théoriques et pratiques de l'art de la chaufournerie.

*Divers modes d'extinction de la chaux.*

Les chaux vives sortant des fours et exposées à l'air en absorbent l'humidité et l'acide carbonique, et même, suivant M. Treussart, une certaine quantité d'oxygène. Il est donc très-difficile et même dangereux quelquefois de les conserver dans cet état; et dès-lors on préfère les conserver à l'état de chaux éteinte, toutes les fois qu'il n'est pas possible de les cuire au fur et à mesure des besoins, et près des lieux de consommation.

M. Vicat et M. Treussart distinguent trois procédés d'extinction de la chaux.

Le premier, ou le procédé *ordinaire*, consiste à délayer la chaux avec de l'eau dans des bassins en bois, puis à la couler dans des fosses en maçonnerie ou en terre forte; au bout de quelque temps la chaux s'épaissit, et on la couvre alors d'une couche de sable ou de terre pour la préserver du contact de l'air, qui la ferait retourner à l'état de carbonate. M. Treussart pense que l'épaississement de la chaux ainsi coulée, tient à ce qu'elle se combine lentement avec une partie de l'eau.

Le deuxième procédé, dit par *immersion*, consiste, suivant son inventeur M. Lafaye, à plonger la chaux vive pendant quelques secondes dans l'eau, à la retirer avant qu'elle ne *fuse*, à la laisser s'éteindre et convertir en poudre, puis à la conserver dans un lieu sec. M. Treussart y a substitué l'arrosage de tas de chaux d'une faible hauteur, avec un volume d'eau égal au quart de celui de la chaux vive. Lorsque les vapeurs d'eau et de chaux ont cessé, on retourne un peu la chaux pour achever d'éteindre les morceaux qui n'auraient pas encore fusé; puis on presse le tas de chaux avec le dos de la pelle, et on le recouvre avec le sable ou les matières avec lesquelles il doit être mélangé.

Le troisième procédé, dit extinction à l'air ou *extinction spontanée*, consiste à soumettre la chaux vive à l'action lente de l'air; alors elle s'éteint graduellement et finit par se réduire en poussière.

M. Vicat a rangé ainsi les procédés d'extinction relativement aux qualités de la chaux :

Chaux très-hydrauliques : — procédé ordinaire;

Chaux moyennement hydrauliques : — extinction par immersion;

Chaux grasses et communes : — extinction spontanée.

M. Treussart, d'accord avec M. Vicat pour les deux premières catégories, ne l'est point pour la troisième : il reproche à l'extinction spon-

tanée l'inconvénient d'être inégale pour des chaux communes ; de donner lieu, pour les mortiers immergés, à des gonflements qui pourraient déliaisonner les ouvrages d'art; et pour les mortiers à l'air, à des désaggrégations dues à la même cause. Il prétend de plus que ce procédé, mettant la chaux en contact continuel avec l'air, reconstitue des carbonates calcaires.

M. Treussart propose d'appliquer aux chaux communes à peu près les mêmes procédés d'extinction qu'aux chaux hydrauliques.

Du reste on peut voir dans M. Vicat quelle est l'influence qu'il attribue sur le décroissement de la résistance des mortiers à tel ou tel mode d'extinction.

Les constructeurs qui, dans beaucoup de localités, ne peuvent avoir la chaux au fur et à mesure des besoins, et sont obligés de la faire venir de l'extérieur longtemps à l'avance, seront préoccupés surtout des fâcheux effets que l'extinction tardive des chaux pourrait avoir sur des maçonneries de peu d'épaisseur en pierres de taille ou menus matériaux, et ils donneront la préférence au procédé ordinaire d'extinction, pour *toute espèce de chaux.*

*Plâtres-ciments, Ciments romains, de Pouilly, de Baye, de Vassy.*

Toutes ces substances sont improprement dénommées; car ce sont évidemment des chaux hydrauliques d'une grande énergie, puisqu'elles peuvent, après avoir été mises en pâte, durcir sous l'eau sans mélange avec d'autres ingrédients, et qu'elles peuvent néanmoins être mélangées avec les sables et avec les ciments proprement dits, et former des mortiers hydrauliques. Les substances dont il s'agit sont des chaux mêlées en grande proportion d'argile, et forment la transition des chaux hydrauliques aux pozzolanes calcaires.

Pendant longtemps on ne connaissait sous la dénomination de *plâtre-ciment* et *ciment romain*, que le résultat de la trituration et de la calcination de pierres et de galets qu'on ramasse sur les côtes anglaises et françaises de la Manche.

Les galets de Boulogne, presque toujours plats, n'excèdent pas l'épaisseur de la main; leur couleur est d'un gris rougeâtre; leur pesanteur spécifique est de 2,16. Ils sont très-durs, se cassent difficilement, ne font point feu sous le briquet, et font effervescence avec les acides.

Quand ils sont cuits et pulvérisés, on les gâche avec l'eau à la manière du plâtre; la chaux qui en résulte durcit aussitôt comme le plâtre à l'air et à l'eau. On a fabriqué avec le plâtre-ciment de Boulogne des tuyaux de conduite de quelques lignes d'épaisseur; après quelques jours de fabrication, on les a laissés remplis d'eau pendant quelque temps sans que la surface extérieure eût la moindre trace d'humidité. On a soudé avec cette matière des prismes fabriqués avec elle, des briques et des morceaux de pierres calcaires; après trois jours de séjour dans l'eau, il a fallu employer le ciseau aciéré pour les séparer. On a fait subir à ce plâtre-ciment, après l'emploi, des variations de température, depuis 6° au-dessous de zéro, de Réaumur, jusqu'à une chaleur très-forte, de 65 à 75° du pyromètre de Wegdwood, sans qu'il y ait eu altération. Son retrait à cette température, comparé à celui d'une masse d'argile pure, a été de 4 à 5. On l'a employé avec succès à faire des vases, des tuyaux, des bétons imperméables à l'eau, des enduits sur des murs humides où d'autres mastics ne pouvaient adhérer.

En Angleterre, les pierres d'où l'on extrait le *ciment romain*, se trouvent dans les étages supérieurs des terrains secondaires, sur les rives de la Tamise, et en rognons au milieu de couches marneuses.

M. Lacordaire a retrouvé la même pierre, il y a environ quinze ans, à Pouilly, dans la même formation géologique; et il a été établi sur ce point une fabrication sur une grande échelle. Il paraît qu'à Baye, près Nevers, et à Vassy en Champagne, le calcaire susceptible de donner les plâtres-ciments existe également; enfin on en a trouvé en Russie.

M. Petot donne la composition suivante de ces divers produits, abstraction faite de l'acide carbonique :

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Ciment anglais . . . . . . . . . | 55,00 | chaux, | 44,00 | d'argile. |
| Ciment de Boulogne . . . . . . | 54,00 | — | 46,00 | — |
| Ciment de Pouilly, 1re variété . | 42,86 | — | 57,14 | — |
| *Id.* 2e. . . . . . | 36,37 | — | 63,63 | — |
| Ciment de Russie. . . . . . . . | 62,00 | — | 38,00 | — |
| Ciment de Baye. . . . . . . . . | 21,62 | — | 78,38 | — |

La plupart de ces corps contiennent encore de l'acide carbonique, et en laissent dégager par les acides.

M. Petot pense que leur fabrication peut être également bonne, soit qu'on les cuise incomplétement, de manière à les laisser à l'état de sous-carbonates; ou qu'on les surcalcine.

5

Comme les chaux hydrauliques, ces matières s'altèrent très-rapidement; bien que dans les fabriques on les embarille par quantités de 150 kilogrammes, et qu'on les garnisse d'un double fût. Au bout de quelques semaines ou mois, suivant les saisons, elles ont perdu leur propriété caractéristique de durcir presque instantanément comme le plâtre; toutefois leur résistance définitive au bout de deux ou trois ans, n'est pas considérablement diminuée. M. Petot est parvenu à leur rendre leur vitesse originaire de prise, en les calcinant dans un four à réverbère. Il a même obtenu la revivification dans des creusets de mortiers, faits avec le plâtre-ciment de Pouilly. Au port de Lorient on a fait l'épreuve sur des grandes quantités de ces mortiers, et dans des fours à chaux, ainsi que M. Petot le conseillait, et l'expérience a été très-satisfaisante.

Comme ces matières sont très-chères à raison de la grande distance des lieux d'origine et des précautions qu'exige leur embarillage, on a expérimenté si l'on ne pourrait pas les mélanger avec le ciment ou même le sable ordinaire. Il résulte, d'épreuves faites par M. Petot et confirmées au port de Lorient, que la vitesse de prise variait depuis 1 heure 2 minutes, jusques à 1 heure 18 minutes, quand on mélangeait 1 de ciment avec $\frac{1}{2}$, 1, 1 $\frac{1}{2}$ et 2 de sable; et que les résistances à la rupture transversale au bout de deux mois d'exposition à l'air, étaient, relativement à celles du ciment pur, âgé de 35 jours environ, comme $6^k,65$, $4^k,50$, $3^k,77$ et $2^k,66$ étaient à 9 kil.

L'adhérence des plâtres-ciments de Pouilly et anglais aux pierres de granit et à la brique, lorsque l'effort est parallèle au plan de rupture, a varié de $0^k,40$ à $2^k,150$ par centimètre carré, dans des épreuves faites par M. Sganzin, Ingénieur des travaux maritimes, et qui avaient duré depuis neuf jours jusqu'à trois mois. Elles sont relatées dans les *Annales maritimes* de 1830.

Le ciment pur, et même mélangé avec le sable, adhère beaucoup au fer, et l'on s'en sert à Lorient pour le scellement des gonds. L'adhérence varie suivant la qualité du plâtre-ciment pur de Pouilly, par centimètre carré, de 8 à 18 kil. d'après les expériences de M. l'Ingénieur Sganzin déjà cité, et sans que le temps au delà des trois à quatre premiers jours paraisse avoir de l'influence.

Malheureusement l'expérience en grand a aussi confirmé à Lorient, après cinq mois d'emploi à l'air, les inductions sur la gélivité des plâtres-ciments

de Pouilly tirées par M. Petot, de l'application à cette matière, du procédé de M. Brard.

On renvoie pour de plus amples détails sur les plâtres-ciments, etc., à l'ouvrage déjà cité de M. Petot, intitulé : *Recherches sur la chauffournerie.*

---

# RÉSUMÉ DE LA QUATRIÈME LEÇON.

DES POZZOLANES ET CIMENTS NATURELS. — DES TRASS. — DES POZZOLANES ET CIMENTS ARTIFICIELS. — DE LA CENDRÉE DE TOURNAI. — DU SABLE. — DU PLATRE.

## *Pozzolanes, Ciments, Trass.*

La dénomination de pozzolane et de ciment appartient aux substances naturelles ou artificielles qui ont la propriété, en les mélangeant avec la chaux commune, de produire des mortiers susceptibles de durcir à l'air et sous l'eau. Ces substances, gâchées seules avec l'eau, n'auraient pas cette dernière propriété.

Les pozzolanes naturelles sont, ou des produits volcaniques, ou les résultats de la calcination d'argiles naturelles par la chaleur volcanique, et par celles des laves sorties de ces volcans. Pozzolanes naturelles.

On connait depuis longtemps les pozzolanes d'Italie, qui ont donné aux substances du même genre, un nom dérivé de Pouzzoles, près de Naples, où il en existe beaucoup. Celles qu'on tire d'Italie, viennent des rives du Tibre, et s'embarquent à Civitta-Vecchia. Il en existe en Auvergne et dans le Vivarais; dans la Haute-Vienne, la Haute-Loire, et sur les bords du Rhin, aux environs d'Andernach. Les Antilles françaises en contiennent également.

Ces substances sont généralement à l'état pulvérulent, et de couleurs très-diverses dues aux oxides de fer et de manganèse. Toutefois, à Andernach, la pozzolane est à l'état de moellon, et est pulvérisée par des moulins à vent, et alors elle prend le nom de *trass* ou *brohl*, et est expédiée au loin. On a profité dans la reconstruction de la grande écluse de Sliken près Ostende, des démolitions de plusieurs églises gothiques de Belgique qui étaient construites en moellons d'Andernach.

Les arènes du Périgord, dont la découverte est due à M. l'Ingénieur

Girard de Caudemberg; celles des vallées de la Flandre et de la Somme, découvertes ensuite par MM. les officiers du génie; les grauwackes de Carhaix, employés pour la première fois par MM. les ingénieurs des ponts et chaussées Avril et Payen; les sables de gneiss de Brest, indiqués par M. Petot; certains sables argileux de la Bretagne sont considérés aussi par M. Treussart comme des produits autrefois ignés, mais depuis longtemps soumis à l'action de l'air et de l'humidité. Mais ces substances, sauf les arènes, n'ont qu'une faible énergie et ont besoin d'une nouvelle torréfaction.

La composition chimique des pozzolanes doit varier beaucoup, non-seulement d'une localité à l'autre, mais encore dans chaque localité; et les analyses peuvent dès lors donner des différences notables. D'après M. Berthier, celles de la pozzolane d'Italie et des trass sont :

| | Pozzolanes d'Italie. | Trass. |
|---|---|---|
| Silice . . . . . . . . | 0,445 | 0,570 |
| Alumine. . . . . . . | 0,150 | 0,120 |
| Chaux. . . . . . . . | 0,088 | 0,026 |
| Magnésie . . . . . . | 0,047 | 0,010 |
| Oxide de fer. . . . . | 0,120 | 0,050 |
| Potasse . . . . . . | 0,014 | 0,070 |
| Soude. . . . . . . . | 0,030 | 0,010 |
| Eau. . . . . . . . . | 0,092 | 0,096 |

Ciments artificiels. De même qu'on a cherché à se procurer des chaux hydrauliques artificielles d'après la composition des chaux hydrauliques naturelles, on a eu recours depuis très-longtemps à des ciments artificiels.

Ainsi, de temps immémorial, les débris triturés des tuiles, des briques et autres objets en argile cuite, réfractaire ou fusible, ont été employés pour former avec les chaux communes, des mortiers hydrauliques.

Chaptal, dès 1786, avait publié un mémoire sur la calcination des terres ocreuses, où il attribuait par erreur, à l'oxide de fer les propriétés hydrauliques. M. de Cessart, en 1787, avait constaté à Cherbourg que des basaltes de la Haute-Loire, calcinés et pulvérisés, pouvaient remplacer les pozzolanes d'Italie.

L'analyse du basalte a présenté sur 100 parties :

| | |
|---|---|
| Alumine . . . . . . . . . . . | 16,75 |
| Silice. . . . . . . . . . . . | 44.50 |
| Oxide de fer . . . . . . . . | 20.00 |
| *A reporter*. . . . . | 81,25 |

| | |
|---|---|
| *Report.* . . . . . . . . | 81,25 |
| Chaux . . . . . . . . . . . . | 9,50 |
| Oxide de manganèse . . . . . | 2,37 |
| Soude . . . . . . . . . . . . | 2,60 |
| Eau . . . . . . . . . . . . . . | 2,00 |
| Perte. . . . . . . . . . . . | 2,28 |
| | 100,00 |

A l'imitation de Baggé, Ingénieur suédois, M. Gratien le père avait essayé de calciner en 1805 et 1807, les schistes de Haineville, près Cherbourg, dont l'analyse avait donné :

| | |
|---|---|
| Alumine . . . . . . . . . . . . | 26,00 |
| Silice . . . . . . . . . . . . . . | 46,00 |
| Manganèse . . . . . . . . . . | 8,00 |
| Chaux. . . . . . . . . . . . . | 4,00 |
| Oxide de fer . . . . . . . . . | 14,00 |
| Eau et perte. . . . . . . . . | 2,00 |
| | 100,00 |

et il avait obtenu d'assez bons résultats.

En 1806, M. Lemasson pére, Ingénieur en chef à Rouen, essaya avec succès la fabrication des pozzolanes avec des terres ocreuses des environs.

La calcination des grauwackes et du sable de gneiss a produit des pozzolanes d'une énergie moyenne.

A Lorient, après avoir longtemps, et dès 1823, employé pour avoir du ciment artificiel, de l'argile grasse superposée par couches de 16 à 20 cent. à la vase des lagunes du port, et l'avoir fait calciner par couches alternatives, avec du frasil de forges, dans des fours en cône renversé ou cylindrique, on lui a substitué depuis quelques années avec grand avantage, la vase coquillière et grasse provenant du curage du port. Elle est cuite dans ces mêmes fours ou dans des fours à réverbère construits d'après celui que M. Petot a imaginé, et qui est décrit dans ses *Recherches sur la chauffournerie*. Figures 5 des planches. Figures 6 des planches.

M. Bruyère a donné l'idée de pozzolanes factices et calcaires, où la chaux entre pour $\frac{[illegible]}{100}$ et l'argile pour $\frac{[illegible]}{100}$.

M. Saint-Léger en a fabriqué à Paris, où la chaux entrait pour $\frac{[illegible]}{100}$, et l'argile de Passy ou Meudon pour $\frac{[illegible]}{100}$.

M. Petot indique dans ses *Recherches sur la chauffournerie*, deux autres espèces de pozzolanes dosées, la première de $\frac{20}{100}$ de chaux, $\frac{80}{100}$ d'argile; la deuxième de $\frac{25}{100}$ de chaux, $\frac{75}{100}$ d'argile.

C'est à la silice contenue dans les pozzolanes et ciments hydrauliques,

naturels ou artificiels, que ces substances doivent leurs propriétés; aussi la silice seule, mais à un état d'extrême division en gelée ou légèrement torréfiée, donne, par son mélange avec la chaux commune, un bon mortier hydraulique.

Les pozzolanes naturelles n'exigent point, pour leur conservation, d'être à l'abri et dans des lieux secs; cependant la vitesse de la prise des mortiers est retardée, quand ces ingrédients ont été saturés d'humidité. Pour leur emploi, elles réclament quelquefois un tamisage, et la trituration des fragments les plus gros. Cette trituration peut se faire, ou par des battes, par des pilons, ou par des meules mises en action par des hommes, des chevaux ou toutes espèces de moteurs organiques ou inorganiques.

Les pozzolanes et ciments factices ont besoin de passer par ces mêmes manipulations, mais après avoir été calcinés. Dans les premiers temps l'on avait cru que, pour imiter la nature dans la préparation présumée des pozzolanes naturelles, il fallait un degré de chaleur très-élevé, quelle que fût l'espèce d'argile ou de corps à calciner, et l'on avait proscrit toutes espèces de briques peu cuites.

Les recherches de MM. Vicat, Berthier, Treussart, Petot et autres Ingénieurs, ont prouvé que le degré de calcination dépendait de la composition chimique des substances à torréfier, et qu'il était très-essentiel d'adopter un système de four tel, que la calcination fût uniforme, afin d'assurer l'homogénéité des produits.

M. Treussart a annoncé que, quand la chaux entrait pour plus de 6 à 7 centièmes dans la composition, il était de la plus haute importance de ne pas cuire au degré élevé de calcination. La chaux, comme la potasse et la soude, ne paraît pas, selon M. Treussart, augmenter l'énergie des matières; seulement elle permet de réduire les dépenses de la calcination.

Les argiles, seulement ocreuses, doivent, suivant le même Ingénieur, être cuites au degré de la bonne brique; les argiles réfractaires ne craindraient pas le degré de cuisson de la chaux; le schiste bleu demande, suivant M. Vicat, une incandescence telle, qu'il se boursoufle; enfin le basalte doit couler.

M. Treussart a exprimé l'avis que l'eau de mer, mêlée avec l'argile, empêchait les mauvais effets de la surcalcination des argiles calcaires. La vase coquillière que l'on emploie au port de Lorient, a justifié cette assertion.

Le même auteur pense que la calcination des matières destinées à don-

ner des ciments hydrauliques, doit être faite à l'air plutôt qu'en vases clos.

Cela peut-être vrai pour quelques argiles; mais les expériences de M. Petot ne permettent pas de généraliser cette règle.

C'est, au reste, dans l'ouvrage de cet ingénieur et dans les mémoires de M. Treussart qu'on trouvera tous les détails nécessaires sur le degré et le mode de calcination des ciments hydrauliques.

Avant de terminer cette leçon, on dira quelques mots de la cendrée de Tournay et autres de même genre.

Cette cendrée est un résidu de la combustion d'une certaine houille dans les hauts-fourneaux, fours à chaux de Flandre; mélangée à raison de 2 parties en volume contre 1 de chaux commune éteinte, elle produit un mastic excellent pour enduire ou rejointoyer les maçonneries sous l'eau; cela tient à ce que les houilles qui donnent cette cendrée, contiennent de l'argile, qui se trouve ainsi cuite à un courant d'air. Mais si les houilles ne contenaient pas d'argile, ou si cette argile se trouvait mêlée avec trop de chaux, M. Treussart a expérimenté : que dans le premier cas on n'aurait aucun résultat; et que dans le deuxième, on n'aurait que des cendrées de médiocre qualité, si la calcination en avait été trop forte.

### *Du Sable.*

Les sables sont classés, relativement à leurs parties constituantes, en sables calcaires, argileux et métalliques. Ils sont d'ailleurs diversement colorés, suivant les oxides métalliques qui entrent dans leur composition.

On les distingue, selon leur origine, en sable fossile ou de mine, sable de rivière, sable de mer; et suivant leur grosseur en gravier, arène ou gros sable, et sable fin.

Le sable est très employé dans les arts; à l'état de blancheur complète, il est un des éléments de la fabrication du verre.

Mélangé avec l'argile en certaines proportions, il constitue les sables de fondeur, qui servent au moulage.

Il forme le lit et remplit les vides de presque tous les ouvrages en pavés de rues, et commence à être employé pour asseoir les fondations des ouvrages hors de l'eau, sur des terrains peu résistants.

Enfin, on le mélange avec les chaux, seul ou avec les pozzolanes et ciments hydrauliques, pour la composition des mortiers.

Le sable, pour les pavages, les fondations et les mortiers, ne doit pas renfermer de terre végétale.

M. Treussart, dans ses expériences sur les mortiers, a trouvé une résistance du double au simple pour celles où l'on avait combiné avec la même chaux et dans les mêmes proportions, le sable lavé, et le sable non lavé. Il indique, chapitre XIII, page 212, de son ouvrage, le moyen de lavage qu'il a employé.

La prééminence des sables fins sur les sables gros parait établie par les expériences de MM. Vicat et Treussart, lorsqu'il s'agit de chaux hydrauliques; tandis que les gros sables semblent l'emporter pour les chaux communes. Mais pour les enduits, le gros sable parait préférable avec *toute espèce de chaux*, parce qu'il est moins sujet aux retraits et aux fentes.

Le sable de mer présente tous les degrés de grosseur et de finesse; il ne faut l'admettre, à cause de ses propriétés hygrométriques, qu'avec beaucoup de circonspection dans toutes les maçonneries d'édifices, et l'exclure des parties qui doivent être en contact avec du bois.

Le sable argileux jaunâtre ou roussâtre, a déjà quelques propriétés hydrauliques des *arènes*, dont il a été question à l'article ciment. On l'emploie de préférence pour les maçonneries de caves, de murs de soutènement. En Bretagne, la plupart des constructions particulières sont faites avec ce sable, mélangé avec un quart seulement de son volume de chaux éteinte. Des vieux quais, construits en mortier de ce même sable avec la proportion ordinaire de chaux commune, ont très-bien tenu; et leur démolition au bout de seize à dix-sept ans, a manifesté la dureté du mortier hydraulique ordinaire.

### *Du Plâtre.*

La substance connue sous le nom de *gypse*, ou pierre à plâtre pure, est un sulfate de chaux.

Ce sel est insipide, d'une forme très-variée, mais sa forme primitive est un prisme quadrangulaire rhomboidal.

Cette substance, exposée au feu, décrépite et devient friable.

Sur 100 parties, le gypse pur est ainsi composé.

| | |
|---|---|
| Acide. . . . . . . . . . . . . | 46,00 |
| Chaux . . . . . . . . . . . | 32,00 |
| Eau. . . . . . . . . . . . . | 22,00 |
| | 100,00 |

La pierre qu'on calcine pour en obtenir le plâtre n'est presque jamais pure ; c'est un mélange de sulfate et de carbonate calcaires.

L'action du feu fait perdre au sulfate calcaire son eau de cristallisation, et au carbonate calcaire son acide : ainsi le plâtre calciné est souvent un mélange de chaux vive et de sulfate calcaire privé d'eau, et c'est ce mélange favorable à la durée des ouvrages qui fait préférer le plâtre de Paris à ceux d'autres contrées.

D'après la composition de cette substance, on voit que le bon plâtre exige un certain degré de calcination. S'il est trop fort ou trop faible, l'opération est manquée. On conçoit encore comment le plâtre exposé à l'air doit perdre successivement sa dureté ; et pourquoi, lorsqu'on l'emploie dans les lieux humides, il s'exfolie et tombe en poussière.

Malgré ces inconvénients attachés au plâtre, qui doivent en faire rejeter l'emploi pour la construction des édifices et des monuments *publics*, cette substance est cependant très-utile dans l'art de bâtir, et son emploi avantageux pour certains ouvrages dans la construction des maisons des particuliers.

La résistance à l'écrasement du plâtre cuit et manipulé a été trouvée par M. Rondelet (*voir* l'Art de bâtir, tom. I), après sa prise complète, d'environ 50$^{kil.}$ par centimètre carré, pour le plâtre gâché à l'eau ; et de 70$^{kil.}$ pour le plâtre gâché au lait de chaux. La résistance à l'extension est donnée par le même auteur pour 4$^{kil.}$ par centimètre carré ; et M. l'Ingénieur Sganzin, dans des expériences déjà citées, a obtenu depuis 4 jusqu'à 9$^{kil.}$ pour des plâtres âgés de 2$^{h.}$ à 12$^{j.}$. Rondelet n'a trouvé que 3$^{kil.}$ pour l'adhérence aux pierres et aux briques, lorsque la force qui détache est normale au plan de rupture. M. l'Ingénieur Sganzin a trouvé pour l'adhérence aux briques, lorsque l'effort est parallèle au plan de rupture, de 1$^{k}$,78 à 1$^{k}$,41 par centimètre carré, pour des plâtres âgés de 9$^{j.}$ à 1$^{mois}$. Ces diverses adhérences diminuent de beaucoup avec le temps, à l'inverse des mortiers. Mais à toute époque, l'adhérence des molécules du plâtre entre elles paraît plus grande, que celle qui les attache aux pierres, aux briques, etc., etc. Résistance du plâtre.

L'adhérence du plâtre au fer a été trouvée, par M. l'Ingénieur Sganzin, de 10 à 17$^{kil.}$ par centimètre carré, après 9 et 17$^{j.}$ de temps.

Si le plâtre a beaucoup d'adhérence avec les pierres et les briques, il en a fort peu avec le bois ; on est même dans l'usage de garnir avec de petits clous, les bois qu'on veut couvrir de plâtre. C'est ainsi qu'on parvient à en-

6

duire avec cette substance l'intérieur et l'extérieur des maisons, dans toutes les parties où l'on a employé du bois en parement.

Cuisson et emploi du plâtre.

Le meilleur procédé pour la calcination du plâtre consiste à lui appliquer d'abord une chaleur modérée, afin de lui faire perdre son humidité et toute l'eau qui n'est pas en état de combinaison. On augmente ensuite le feu, mais moins que pour la calcination de la chaux; et de dix à vingt-quatre heures de ce degré de feu suffisent ordinairement, pour obtenir la cuisson complète d'une fournée de 8 à 20$^{m.c.}$. La dépense de combustible est d'environ 275$^{kil}$ de bois par mètre cube de plâtre brut.

Figures 7 des planches.

Le plâtre est suffisamment cuit lorsque l'ouvrier, en le gâchant, sent qu'il est onctueux et qu'il s'attache aux doigts. Il n'a pas ces propriétés, lorsqu'il est trop ou trop peu calciné.

Comme le plâtre calciné perd de ses qualités lorsqu'il reste quelque temps exposé à l'air, il faut l'employer au sortir du four. On le réduit en poudre en l'écrasant avec des battes; des meules ou cylindres de pierres ou de fer seraient plus convenables. On tamise le plâtre pour réserver les parties les plus fines aux dernières couches des plafonds et enduits, et aux moulures.

Dans les pays qui ne fournissent point de plâtre, il faut le faire venir en pierre avant sa calcination; et pour le succès de l'emploi de cette substance, cette calcination doit se faire sur les lieux mêmes, et immédiatement avant d'en faire usage.

On emploie le plâtre clair, ou épais, suivant l'usage auquel on le destine. Pour les scellements, on ne mouille que pour former une pâte ferme: c'est ce que l'ouvrier nomme *gâcher serré*. Pour des moulures, on y met plus d'eau; c'est ce qu'on appelle *gâcher clair*. Pour les enduits, on mouille encore davantage.

On observe en général que pour les ouvrages ordinaires il faut, pour gâcher le plâtre, une quantité d'eau à peu près égale à son volume.

Comme le plâtre calciné contient peu de carbonate calcaire, il en résulte que le plâtre gâché n'a pas de causticité; l'ouvrier peut le manier impunément dans l'auge où il a été gâché; et pour façonner ses ouvrages, il se sert autant de ses mains que de sa truelle.

On gâche quelquefois le plâtre avec le lait de chaux pour augmenter sa dureté; on se sert aussi d'eau dans laquelle on a fait dissoudre de la colle forte. Ces procédés, et surtout le dernier, procurent plus de solidité aux ouvrages qui en proviennent; ils peuvent même recevoir un assez beau

poli et être veinés et marbrés. C'est ainsi qu'on fait le stuc à Paris.

M. Sganzin (Théodore), Ingénieur des travaux maritimes, déjà cité, a obtenu, en mêlant du plâtre ordinaire aux plâtres-ciments anglais et français, des combinaisons remarquables par la chaleur qu'elles dégageaient, la promptitude instantanée du durcissement, et la grande résistance des produits composés. Cette dernière dans le sens de la traction longitudinale a été par centimètre carré depuis $4^{kil.},43$ jusqu'à $6^{kil.},18$, après deux heures d'âge (*voir* les Annales maritimes et coloniales de 1830).

L'une des propriétés du plâtre gâché, et qu'il est bien important de connaître, c'est celle d'augmenter considérablement de volume en se solidifiant. Cette propriété du plâtre est opposée à celle des mortiers, qui diminuent de volume en durcissant. Il faut y avoir égard, et isoler des murs d'enveloppe les ouvrages que l'on construit avec cette substance. Sans cette précaution, il résulterait de cette augmentation de volume des effets fâcheux, et quelquefois même le déversement des murs. A Paris on laisse un jeu de 4 à $5^{cent.}$ entre les maçonneries en élévation, de moellons et plâtre, et les chaînes verticales en pierres de tailles qui les encadrent.

---

# RÉSUMÉ DE LA CINQUIÈME LEÇON.

DES MORTIERS. — BÉTONS. — MASTICS.

## *Des Mortiers.*

Les mortiers sont des mélanges, en diverses proportions, de chaux avec d'autres ingrédients. Leur destination est de lier les éléments des maçonneries et de protéger leurs surfaces apparentes.

Ils doivent donc être considérés sous le rapport de leur adhérence aux divers matériaux des constructions, et de la résistance qu'ils acquièrent par eux-mêmes; sous celui de leur vitesse de prise isolément ou dans leur liaison avec ces matériaux; enfin sous celui de leur inaltérabilité par les différences de température et par le temps.

On distingue les mortiers en deux grandes classes : mortiers *hydrauliques*, c'est-à-dire susceptibles de durcir sous l'eau; et mortiers *ordinaires*, qui n'ont pas cette propriété, ou ne l'ont qu'à un faible degré.

Adhérence des mortiers.

On n'a pas comparé encore les mortiers de chaque catégorie sous le rapport de leur adhérence aux matériaux des constructions; seulement on a reconnu qu'en général les mortiers adhéraient plus aux surfaces dentelées qu'aux surfaces unies; aux pierres poreuses qu'aux pierres compactes; aux pierres à pâte grossière qu'à celles à pâte fine; plus aux pierres meulières qu'aux pierres calcaires; plus à celles-ci qu'aux pierres granitiques et schisteuses; et que le basalte et le grès étaient les corps avec lesquels le mortiers avaient le moins d'adhérence.

D'après les expériences de Rondelet (Art de bâtir), la force normale au plan de rupture nécessaire pour opérer par détachement la séparation de matériaux liés pendant six mois par des mortiers ordinaires de chaux et de sable et conservés à l'air, a été pour 25 centimètres quarrés superficiels :

| | | |
|---|---|---|
| Pour deux pierres de liais polies au grès. . . | 64 liv. | (32 kil.) |
| Mêmes pierres avec surfaces moins unies. . . | 70 | (35 kil.) |
| Pierres d'Arcueil. . . . . . . . . . . . . . . | 72 | (36 kil.) |
| Pierres de Conflans. . . . . . . . . . . . . . | 108 | (54 kil.) |
| Pierres meulières. . . . . . . . . . . . . . . | 123 | (61k,50) |
| Briques de Bourgogne . . . . . . . . . . . . | 138 | (69k,00) |
| Tuileaux. . . . . . . . . . . . . . . . . . . | 141 | (70k,50) |

Dans les premières années, les mortiers paraissent plus adhérer aux matériaux qu'à eux-mêmes; et la déliaison se fait par le milieu des joints en mortier.

En prenant une moyenne de la force d'adhérence déduite de beaucoup d'expériences de Rondelet, Boistard, etc., on trouve pour les pierres calcaires au moins 800 liv. par pied carré, ou 370 kil. par mètre carré, ou 0kil.,37 par centimètre carré, lorsque l'effort est dirigé parallèlement au plan de rupture et tend à faire glisser.

Action de la chaleur.

Sous le rapport des effets des variations de la température, on sait que tous les mortiers contenant de la silice et de la chaux sont susceptibles de vitrification à une forte chaleur.

Action du froid.

Le froid n'attaque point les mortiers sous l'eau; mais les mortiers à l'air surtout en enduits ou lames minces, sont susceptibles de s'écailler par la gelée, s'ils ne sont pas complétement durcis et séchés avant l'hiver; et l'on a déjà dit que les plâtres-ciments, malgré leur prompt durcissement, étaient aussi susceptibles de gélivité.

Influence du temps.

Le temps augmente de plus en plus la résistance des mortiers, mais

beaucoup plus, proportion gardée, pendant les premières années, que dans celles qui suivent; en sorte qui si l'on représente graphiquement par les coordonnées d'une courbe les âges des mortiers et leurs résistances, cette courbe est une sorte d'hyperbole asymptotique. Rondelet a trouvé qu'en dix-huit *ans*, des mortiers divers n'avaient gagné moyennement qu'un huitième en sus de la résistance à l'écrasement qu'ils avaient après dix-huit *mois*.

La grande dureté des mortiers antiques parvenus jusqu'à nos jours, ne tient pas à leur âge, mais bien à leur composition; et il n'est pas un constructeur qui n'ait eu à démolir des maçonneries de six à huit années d'âge, et qui n'ait trouvé, qu'après ce laps de temps, les mortiers réellement hydrauliques présentaient autant de résistance que les mortiers antiques.

On croit avoir remarqué que les mortiers qui avaient la plus grande vitesse de prise, gagnaient beaucoup moins par l'âge, que ceux dont la prise avait été la plus lente.

Mortiers hydrauliques.

On avait attribué pendant longtemps l'hydraulicité et la vitesse de prise des mortiers sous l'eau à leur mode d'extinction. De là les prétendues merveilles des procédés Lafaye, Fleuret et Loriot. Ce dernier ajoutait une petite quantité de chaux vive à la chaux éteinte au moment du corroyage des mortiers.

Aujourd'hui il résulte des recherches dont M. Vicat a donné le signal; que la nature des ingrédients qui entrent dans les mortiers, et leur dosage, ont la principale influence sur leurs qualités; et que l'extinction de la chaux, et la manipulation des mortiers, peuvent améliorer ou atténuer ces résultats, mais ne peuvent transformer un mauvais mortier en un mortier hydraulique.

Si la nature des travaux à exécuter, par exemple des travaux de marées, de rivières sujettes à des crues subites, de batardeaux, exigent une grande vitesse de prise; il faut employer nécessairement les chaux hydrauliques nommées plâtres-ciments, fraîches ou revivifiées, sauf à y ajouter en volume, suivant les circonstances, $\frac{1}{2}$, 1 ou 1 $\frac{1}{2}$ de sable seul ou mélangé à dose égale avec des ciments hydrauliques. On a vu que le temps de prise pouvait alors varier, suivant M. Petot, depuis 5$^{\text{min.}}$ jusqu'à 1$^{\text{heur.}}$ 20$^{\text{min.}}$ à l'air; et probablement à l'eau, depuis 21$^{\text{min.}}$ jusqu'à 1$^{\text{heur.}}$ $\frac{1}{2}$.

Dans les autres cas, on peut obtenir, avec de la chaux, des mortiers hydrauliques de diverses vitesses de prise et énergies, par deux procédés bien tranchés:

Le premier consiste à mélanger des chaux hydrauliques naturelles ou factices avec du sable quartzeux ou argileux, tel que la localité le donnera, en y joignant, dans l'opinion de M. Treussart, pour les ouvrages soignés, tels que chappes, rejointoiements, etc., une part plus ou moins forte de ciments hydrauliques.

Le deuxième consiste à mélanger des chaux communes avec des ciments hydrauliques naturels ou artificiels, plus ou moins énergiques.

On ne parlera pas des mortiers, où l'on ajoute des cendres chargées de potasse ou de soude, ou des liquides contenant des alkalis ou l'ammoniaque. Ces matières sont très-chères et trop rares, pour être employées habituellement dans les mortiers. Mais on sait qu'elles augmentent la résistance et la vitesse de prise (*voir* l'ouvrage de M. Treussart).

M. Treussart et M. Vicat sont d'accord pour recommander de préférer les chaux hydrauliques *naturelles* pour les mortiers hydrauliques, toutes les fois qu'elles ressortiraient aux mêmes prix que les chaux communes.

Mais M. Treussart n'hésite pas à donner la préférence du 2e procédé sur le premier, quand il faudra opter entre la fabrication de chaux hydrauliques *artificielles*, et celle des ciments hydrauliques. En effet, l'argile est nécessaire dans les deux cas, elle doit avoir à peu près la même composition chimique; et à moins qu'on n'ait du calcaire très-friable qu'on puisse mélanger directement avec l'argile, la fabrication de chaux hydrauliques artificielles exigera deux calcinations; la première pour produire la chaux commune, la deuxième pour la combiner avec l'argile.

M. Treussart objecte de plus la difficulté de cuire au degré convenable et d'une manière homogène les chaux hydrauliques artificielles. Les altérations rapides qu'elles éprouvent, forcent de les préparer au fur et à mesure des besoins, ou de les mélanger, si elles sont altérées, avec des ciments hydrauliques comme si elles étaient des chaux communes. L'on perd ainsi le fruit de toutes les dépenses antérieures, et on n'a pas l'avantage du foisonnement ordinaire des chaux communes lorsqu'elles sont grasses.

Enfin M. Treussart fait remarquer que, malgré l'hydraulicité des chaux factices, il faut pour certains ouvrages l'augmenter par l'addition de ciments hydrauliques; tandis que les mortiers hydrauliques, faits avec la chaux commune, ne perdent presque rien, ni pour la vitesse de prise, ni pour la résistance, en mélangeant du sable ordinaire aux ciments hydrauliques, même jusqu'à la dose d'égalité.

Ce dernier résultat a été pleinement confirmé pour les mortiers hydrauliques faits à Lorient avec la chaux commune maigre de Brest, éteinte suivant le procédé ordinaire.

Une expérience faite sur une grande échelle, par M. l'Ingénieur Julien, aux travaux du pont-canal de l'Allier, vient à l'appui des observations de M. Treussart. Elle est consignée dans les Annales des ponts et chaussées de 1834.

Il ne saurait au reste y avoir de règle générale pour la question qu'on vient d'exposer. Il conviendra dans chaque localité, pour chaque nature de travaux, de faire des essais préalables des mortiers hydrauliques, qu'on obtiendrait suivant l'un et l'autre procédé; et établir les calculs des dépenses en y faisant entrer toutes les chances diverses.

Dans les cas où l'on n'aurait besoin que de mortiers faiblement hydrauliques, dont la vitesse de prise serait indifférente, on pourrait les obtenir, soit en calcinant ou surcalcinant la chaux commune de la localité, soit en y mêlant du sable argileux.

MM. Vicat, Treussart et divers Ingénieurs, ont fait des expériences pour reconnaître la proportion en volume pour laquelle la chaux devait entrer dans les mortiers hydrauliques. Il est évident que ce dosage dépend de l'état dans lequel se trouve la chaux par suite de son mode d'extinction.

Pour les chaux en pâte molle éteintes par le procédé ordinaire, on s'éloigne peu de la proportion de 1 partie de chaux en volume et de 2 parties jusqu'à 2 parties $\frac{1}{2}$ des autres ingrédients, soit sable, soit ciment hydraulique. Pour les mélanges de chaux et sable argileux, la proportion de sable peut aller jusqu'à trois fois celle de la chaux.

Pour les chaux en pâte ferme, comme les chaux éteintes par immersion; M. Treussart a déjà remarqué qu'il fallait diminuer la proportion des ingrédients auxquels on réunit la chaux, et la réduire à 1 $\frac{1}{4}$ ou 2 au plus.

Enfin, pour les chaux éteintes spontanément à l'air, la proportiou des ingrédients, autres que la chaux, ne devrait être que de 1 $\frac{1}{2}$ à 1 $\frac{3}{4}$ pour 1 de chaux.

Au reste, c'est dans les ouvrages de M. Vicat qu'il faut chercher les diverses influences du dosage.

MM. Raucourt et Soleirol, Ingénieurs des ponts et chaussées et du génie, ont émis l'opinion que le dosage de la chaux dans les mortiers devait être

réglé de manière, à remplir tous les vides des autres ingrédients, vides qui peuvent être déterminés par le volume d'eau qui pourrait s'y loger. Mais les expériences ont présenté des anomalies, et il resterait à prouver que les mortiers ainsi dosés sont meilleurs que ceux qu'on obtiendrait par d'autres proportions.

Quant à l'explication théorique du durcissement des mortiers hydrauliques, elle est diversement présentée par MM. Vicat, Treussart et Petot, et c'est dans leurs ouvrages qu'il faut aller la méditer.

Mortiers à l'air. MM. Vicat et Treussart sont d'accord pour attester la grande prééminence des chaux hydrauliques naturelles, sur les chaux communes pour les mortiers à l'air.

Le second de ces auteurs déclare même qu'il n'a pu parvenir à faire des mortiers passables à l'air avec des chaux communes coulées depuis longtemps dans des fosses, et a été surpris de la faible résistance des mortiers faits avec les mêmes chaux fraîchement fabriquées. Ces résultats tiennent peut-être à la nature de la chaux mise en essai par M. Treussart; à l'espèce et au dosage du sable; et à l'humidité de la cave, où les mortiers d'épreuve avaient été laissés pendant un an.

Bien que ces résultats soient infirmés par la pratique générale; il y aurait cependant à examiner dans chaque localité, et pour les diverses natures de travaux, s'il ne conviendrait pas, malgré l'augmentation de dépense, et ainsi que le conseille M. Treussart, d'améliorer les mortiers à l'air faits avec de la chaux commune, en y mélangeant plus ou moins de ciments hydrauliques ou sable. C'est une précaution qui est prise depuis longtemps dans quelques ports militaires pour les maçonneries d'édifices, à raison de l'humidité atmosphérique sur les bords de la mer.

Le dosage doit être le même pour les mortiers à l'air que pour les mortiers hydrauliques faits avec les mêmes chaux : seulement les mortiers destinés à l'air doivent être beaucoup plus mous.

Ces mêmes mortiers ont besoin de ne pas être desséchés par le soleil ou le vent. Il faut donc mouiller fréquemment les matériaux dans les temps secs et chauds; et, s'il s'agit de murs de soutènement, remblayer au fur et à mesure contre l'intrados de ces murs.

Manipulation des mortiers. Le procédé ordinaire consiste à placer la chaux au centre d'un bassin entouré des ingrédients avec lesquels il faut la mélanger; et, si la chaux ou le sable argileux est trop ferme, on y ajoute de l'eau; le corroyage est fait avec des rabots en bois ferrés et armés de longs manches; puis on met

le mortier à se ressuer dans un tas jusqu'au moment de l'emploi. Quand cet emploi arrive tardivement, l'on est forcé de remanier le mortier, en y ajoutant de l'eau pure ou de l'eau de chaux.

Ce procédé est très-prompt; mais l'eau ajoutée au premier mélange trompe sur la bonté de l'opération. Il conviendrait au moins de réduire d'abord séparément en bouillie par l'addition de l'eau, soit la chaux toute seule, soit le sable argileux, et de n'effectuer le mélange qu'après.

Au reste le signe infaillible d'un mélange mal fait, c'est de rencontrer une multitude de points blancs ou particules de chaux dans le mortier ressué ou raffermi.

M. Treussart qui employait dans les travaux de Strasbourg de la chaux éteinte par immersion ou arrosage, faisait opérer le soir l'extinction de la chaux qui devait être corroyée le lendemain matin. Le mélange de la chaux avec les autres ingrédients du mortier s'effectuait une couple de fois au rabot sans addition d'eau, ce qui permettait de retirer les pierres et fragments de chaux mal éteints. Après cela l'on versait sur le mélange l'eau nécessaire pour l'amener à l'état de pâte molle.

M. Treussart a cru pouvoir conclure de diverses expériences qu'il avait suivies; que l'eau jointe aux mortiers dans le corroyage ou pour le rabotage, n'atténuait pas sensiblement leur vitesse de prise, ni leur résistance, *quand du reste le corroyage était bien fait.*

M. Vicat et un grand nombre d'ingénieurs pensent que la bonté relative des mortiers dépend en partie de leur manipulation, et prescrivent le corroyage avec des battes ou pilons.

Quand la consommation journalière du mortier est considérable, l'on a recours à divers appareils mus, soit par les hommes, soit par les animaux, soit par l'eau, soit enfin par les machines à feu.

On trouve dans les *Œuvres de Peyronnet* la description d'un râteau circulaire, mu par un manége, qui a été fréquemment employé dans les grands travaux des ponts et chaussées.

L'ouvrage de M. Treussart décrit des roues-meules, mues également par un manége, et employées à Paris par M. Saint-Léger pour les travaux du canal Saint-Martin. Figures 8 des planches.

Enfin, dans les ports militaires de Toulon et Lorient, l'on a fait corroyer le mortier, avec le plus grand succès, pour de grands travaux de maçonnerie, par quatre chevaux travaillant sur un manége, et remplacés ultérieurement par une machine à feu *locomobile* de six chevaux. Cet appareil

7

qui produisait 30 mètres cubes de mortier en 10 heures de travail, était le râteau de Peyronnet placé à plusieurs étages dans un tonneau circulaire en bois cerclé, ou en fonte de fer. Les dents en fer des râteaux mobiles des divers étages passent à travers les intervalles de fortes dents en fer, posées en rayons, et fixement attachées au tonneau. Les matières, jetées par le haut du tonneau, descendent en hélice jusqu'à une issue qui est au bas de la parois cylindrique. Le même système, mais sur une petite échelle, peut être manœuvré par des hommes poussant circulairement devant eux des barres horizontales fixées à l'arbre vertical du tonneau.

Figures 9 des planches.

Il n'est pas besoin de faire remarquer que le corroyage est d'autant plus intime, que les matières sont maintenues à une plus grande hauteur constante dans le tonneau, et passent par un plus grand nombre de râteaux étagés.

Quel que soit le mode de corroyage, le volume du mortier est toujours moindre que celui de ses parties constituantes avant l'opération. Quand le corroyage est très-intime, le volume du mortier est environ les $\frac{5}{7}$ de la somme des volumes de ses ingrédients. M. Treussart a trouvé $\frac{4}{5}$ pour le mode de corroyage usité à Strasbourg.

Résistance des mortiers.

Pour éprouver la force des mortiers, Rondelet cherchait, par des appareils à levier, leur résistance à l'écrasement, et celle à l'extension dans le sens de la longueur.

M. Vicat, dans ses premiers ouvrages, comparait les résistances des mortiers, d'après les enfoncements d'une tige chargée du poids d'environ 1 kilogramme.

MM. Treussart et Petot ont cherché la résistance à la rupture de petits échantillons de mortier de $0^m,05$ de côté, tantôt posés sur deux appuis à 10 centimètres de distance, et soumis à un effort *transversal* placé au milieu; tantôt engagés à une extrémité et chargés à l'autre, mais il faut alors recourir à une formule plus ou moins hypothétique pour en déduire la résistance à la traction par centimètre carré, ainsi que l'a fait M. Trotté de la Roche, directeur des travaux maritimes de Brest, pour des expériences sur les mortiers publiées dans les *Annales maritimes* de 1826.

A Lorient, M. l'Ingénieur Laurent a substitué à ces appareils un autre direct de traction qui pèse sur des échancrures ménagées dans les briques d'essai, placées alors verticalement; la section minimum de ces briques dans l'échancrure est de $0^m,05$ en carré.

Figures 10 des planches.

Si l'on parcourt tous les tableaux d'expériences sur les mortiers con-

tenus dans les ouvrages de MM. Rondelet, Vicat, Treussart et Petot, et publiés par les Ingénieurs de toutes armes dans les *Annales maritimes*, *Annales des ponts et chaussées*, *Mémorial du génie* et dans les pays étrangers, on aura beaucoup de difficultés à en déduire les limites de la résistance, et la résistance moyenne par centimètre carré, à l'écrasement et à la traction longitudinale, à raison de la diversité des méthodes et des formules employées.

Divers mortiers soumis par Rondelet, à dix-huit mois d'âge, à des pressions qui devaient les écraser, ont donné des résistances qui ont varié par centimètre carré depuis 30 jusqu'à 76 kil.; et à la traction dans le sens de leur longueur, depuis $2^{k},00$ jusqu'à $10^{k},00$.

M. Petot a trouvé pour résistance de traction par centimètre carré des plâtres-ciments, immergés et âgés de 35 jours, de $0^{k},38$ à $2^{k},35$; et pour ces mêmes plâtres-ciments, laissés à l'air pendant 35 jours, une résistance de $6^{k},93$ à $9^{k},20$.

Le même Ingénieur a obtenu pour des mortiers hydrauliques faits avec du sable de *gneiss*; des vitesses de prise dans l'eau, variables de 7 à 35 jours; la résistance par centimètre carré déduite par la formule de Galilée, au bout de 8 mois, variait depuis $0^{k},45$ jusqu'à $2^{k},44$; et au bout de 15 mois, depuis $1^{k},38$ jusqu'à $3^{k},26$.

Les mortiers hydrauliques de M. Treussart, exécutés avec des chaux hydrauliques naturelles et immergées sous l'eau, ont eu une vitesse de prise variable, suivant leur composition, de 4 à 22 jours; et ont présenté, après un an d'âge, des résistances de traction par centimètre carré, variables depuis $3^{k},50$ jusqu'à 30 kil., suivant la composition des mortiers.

Pour les mortiers à chaux hydraulique artificielle, également immergés, la vitesse de prise a varié de 5 à 30 jours, et la résistance de traction, au bout d'un an, de $1^{k},25$ à $17^{k},50$.

Enfin pour les mortiers hydrauliques faits avec de la chaux commune, la vitesse de prise sous l'eau a varié depuis 3 jusqu'à 40 jours; et la même résistance, au bout d'un an, depuis 4 jusqu'à 40 kilogrammes.

Pour les mortiers exposés à l'air et faits avec de la chaux commune éteinte immédiatement, les résistances de traction dans les expériences de M. Treussart ont varié au bout d'un an de $1^{k},20$ à 4 kil.

Pour les mortiers hydrauliques faits avec les chaux hydrauliques naturelles et exposés à l'air, les mêmes résistances ont varié au bout d'un an de 9 à 18 kilogrammes.

Pour les mortiers hydrauliques faits avec des chaux communes et des ciments, la résistance de traction a été de 8 à 30 kilogrammes au bout de 4 mois.

Un fait très-remarquable qui résulterait des essais de M. Treussart sur les mortiers faits avec l'air, c'est que les mortiers *hydrauliques*, bien loin d'augmenter de force avec le temps (même dans l'intervalle d'une année), en perdraient une partie.

Des limites de minimum et maximum aussi éloignées, prouvent combien il est important de faire le choix le plus convenable d'ingrédients pour les mortiers; et que l'on se tiendra dans une juste mesure en n'adoptant pour chiffre de résistance à la traction dans le sens de la longueur, des mortiers hydrauliques, que 1 *kilogramme par centimètre* carré de section *transversale*. La résistance à l'écrasement devait, suivant Rondelet, être considérée comme au moins trois fois plus grande, ou de 3 *kil. par centimètre carré*. Il faut joindre à ces chiffres celui de $0^k,37$ *par centimètre carré* pour la résistance *au glissement*, lorsque la force est parallèle au plan de rupture.

Ces chiffres ne pourraient être dépassés sans danger dans des maçonneries fraîches, et exposées presque immédiatement à tous les efforts auxquels elles doivent être soumises.

Emploi des mortiers par injection.

On doit à M. l'Inspecteur général des ponts et chaussées Bérigny, l'invention d'un procédé dont l'application a déjà prévenu la ruine ou la reconstruction de plusieurs ouvrages hydrauliques d'une grande importance, et notamment des écluses de chasse de Dieppe, du Tréport, de Saint-Valery-en-Caux, et de plusieurs écluses de navigation intérieure.

Figures 11 des planches

Il consiste à injecter par compression, à l'aide d'une sorte de pompe foulante (fig. 11 des planches), des matières convenablement appropriées dans les vides et interstices des ouvrages, et particulièrement à leur assiette de fondation. La pompe d'injection, par l'augmentation de la force comprimante ou la diminution du diamètre de l'ajutoir, est susceptible d'ailleurs de maîtriser les diverses résistances dues à la poussée de l'eau. Les premières pompes avaient 8 centimètres de diamètre intérieur, et leur ajutoir n'en avait que 5.

A la réparation de l'ancienne forme sèche de Rochefort, la pompe avait 16 cent. de diamètre intérieur sur $1^m,20$ de longueur, et la compression s'opérait par une petite sonnette à bras, dont le mouton pesait 75 kilog. Les trous d'injection étaient à 1 mètre de distance les uns des autres et en quinconce d'une série à l'autre.

Le procédé, d'abord employé par M. Bérigny, à refouler de la terre glaise sous des radiers de déversoirs, a été appliqué ensuite par lui et d'autres ingénieurs, avec le plus grand succès, à l'injection de mortiers hydrauliques encore mous et même fluides.

A l'écluse de chasse de Dieppe, M. Bérigny est parvenu à introduire par l'injection 55 m.c de mortier, sous la superficie totale du radier, qui était de 180 m.q.

Mais cet Ingénieur recommande, dans le mémoire qu'il a publié sur cette utile découverte :

1° D'avoir soin d'enceindre exactement, et dans tous les sens, les zones où il y a des vides à remplir, afin que les matières ou mortiers injectés ne puissent s'écouler au dehors, et que leur accumulation les fasse presser et adhérer fortement contre toutes les parois;

2° De vider la même enceinte, de toutes les vases molles qui sans cela se mêleraient aux matières injectées et en empêcheraient la cohésion;

3° De ménager des évents pour le dégagement de l'air dans les divers petits canaux irréguliers où l'injonction doit s'opérer;

4° De disposer, espacer et percer les tuyaux de communication de la pompe d'injection avec l'enceinte à injecter, de manière que cette pompe, placée dans un tuyau, fasse dégager les matières refoulées par tous les trous les plus voisins, et qu'en continuant de proche en proche à la faire fonctionner dans tous les trous d'une même série et d'une série à l'autre, on ne puisse laisser aucun vide.

Les injections devraient d'ailleurs être faites en *plâtres ciments* purs ou mélangés avec le sable, toutes les fois qu'un prompt durcissement serait indispensable, comme, par exemple, dans des ouvrages à la mer, et lorsque cette dernière éprouve de fortes dénivellations.

Il y a des exemples détaillés de l'emploi de ce procédé dans le mémoire de M. Bérigny, et dans divers articles insérés aux *Annales des ponts et chaussées* de 1831 à 1837.

### *Des Bétons.*

Le béton, dit M. Treussart, n'est autre chose qu'une maçonnerie faite avec du mortier hydraulique et des petits fragments de pierres. Sa bonté dépend donc de la bonne qualité des mortiers, de leur adhérence avec les fragments de pierres et de leur dosage avec ces derniers.

Tout ce qu'on a dit ci-dessus sur les mortiers hydrauliques, pour leur

adhérence aux diverses espèces de pierres, s'applique donc ici. Le choix et la grosseur des recoupes ou fragments de pierres pour la confection du béton, ne sont donc pas indifférents.

Dosage. Quant à leur proportion relativement à celle des autres ingrédients des mortiers, on a donné diverses formules, l'une d'elles est comme il suit :

Pour 40 parties en volume :

10 parties de chaux vive,
12 de pozzolane ou ciment artificiel,
6 de gros graviers,
12 de blocailles ou recoupes de la grosseur d'un œuf.

M. Treussart, qui a expérimenté des bétons diversement dosés, a recommandé d'ajouter, pour un volume total d'ingrédients des mortiers, hydrauliques, de 0,60 à 0,75 de petites pierres, dont 0,20 à 0,25 en gravier, et 0,40 à 0,50 en recoupes de pierres de la grosseur d'un œuf.

Au barrage de Saint-Valery et à l'écluse de Saint-Remy (voir *Annales des ponts et chaussées* de 1832), le béton était ainsi dosé :

1°

| | |
|---|---|
| Chaux grasse employée vive . . . . | 0m.c.,42 en volume. |
| Ciment de tuileau . . . . . . . . . | 0 ,21 |
| Cailloutis de silex. . . . . . . . . . | 0 ,75 |
| Eau (plus ou moins) . . . . . . . | 0 ,40 |

2°

0m,45 de mortier ainsi dosé : { 0m.c.,22 de chaux peu hydraulique en pâte, 0 ,225 de ciment, 0 ,225 de sable.

0 ,87 de cailloutis,

1 ,32 formant un mètre cube de béton après la manipulation.

A l'écluse de Huningue le dosage pour un mètre cube de béton était :

0m,22 de chaux hydraulique en pâte,
0 ,40 de sable,
0 ,69 de cailloux.

1 ,31

M. l'Ingénieur Boisvillette, dans une note insérée aux *Annales des ponts et chaussées* de 1837, est arrivé aux résultats suivants pour les réductions de volume des ingrédients du béton :

La manipulation des ingrédients du mortier produit une première

réduction de 15 p. 100 sur leur volume; le mélange du mortier avec les cailloux produit une réduction de 10 p. 100 sur le volume primitif de ces deux éléments; enfin la submersion du béton déterminait 20 p. 100 de réduction environ sur le volume du béton sec, en sorte que la réduction totale des cubes primitifs des ingrédients était renfermée entre 30 et 40 p. 100.

Quant à la manipulation, on commence par faire le mortier; puis on le mêle avec le gravier et les recoupes, à bras d'hommes, avec le rabot ferré et la pelle. Si le béton doit être versé dans l'eau, M. Treussart conseille, afin qu'il se délaie moins, de le laisser se durcir à l'air jusqu'à ce qu'il ait acquis une demi-consistance qui permette de le détacher en gros morceaux. M. Vicat assure que, sous le rapport de la dureté absolue, il vaudrait mieux l'immerger immédiatement. Manipulation et emploi.

Le versement du béton sous l'eau s'est fait avec de longues trémies; mais ce moyen a le grand inconvénient de mettre cette matière en contact avec l'eau pendant un trajet souvent de 7 à 8 mètres, et de provoquer la déliaison par le jeu des pesanteurs spécifiques, et par la dissolution de la chaux dans l'eau. L'on y a substitué, des caisses fermées pendant le trajet, et qu'on ouvre quand le béton est rendu à profondeur, ou des cuillers à *poche* mobiles autour de leur anse, et que l'on fait renverser au fond (voir l'ouvrage de M. Treussart, chapitre 9, page 163). Figures 12 des planches.

Par des râteaux, ou mieux, par des rouleaux en fonte comprimant et cheminant sous l'eau, on régale ensuite uniformément les tas de béton immergés. On trouvera, dans le mémoire de M. l'Ingénieur en chef Beaudemoulin (*Recherches théoriques et pratiques sur les fondations par immersion*, imprimé en 1828), l'indication des caisses employées pour le versement du béton à l'écluse de Huningue. Une discussion très-intéressante sur les avantages et inconvénients comparatifs des caisses et des trémies se trouve dans les *Annales des ponts et chaussées* de 1832.

Les bétons ainsi préparés, peuvent aussi former des pierres factices pour les constructions à l'air ou à l'eau : on en a fait à Alexandrie, de $1^m,40$ de longueur sur $0^m,80$ de largeur et $0^m,80$ de hauteur, qu'on a enfouies sous terre pendant deux ou trois ans pour obtenir un durcissement lent, et sans retraits ni gerçures. On se servait de la chaux hydraulique de Casal dans les proportions de 0,24 de chaux mesurée en pâte, 0,90 de sable et 0,20 de cailloux. On a recours aussi depuis longtemps en Emploi du béton pour pierres factices. Figures 13 des planches.

Italie et en France au béton, pour l'aire des terrasses extérieures, et pour remplacer les planchers et carrelages intérieurs.

M. Fleuret a fabriqué, d'une manière analogue, des tuyaux de conduite d'eau, qui étaient de véritables mortiers hydrauliques, avec léger excès de sable, qu'il plaçait dans des moules, où ils étaient massivés et serrés fortement.

Au canal Saint-Martin M. l'Ingénieur Devilliers a employé, pour la construction des murs de rive, des espèces de briques très-résistantes, fabriquées avec une partie de chaux hydraulique et *sept parties de sable*. Après une macération prolongée, ce mortier a supporté une pression de 8 kilog. par centimètre carré sans rompre; et des blocs de $0^m,50$ d'épaisseur superposés, n'ont été pénétrés d'eau que jusqu'à 40 centimètres, sous une pression d'eau de $1^m,50$.

On pourrait exécuter les murs d'habitation en béton, comme on fait les murs en pisé; en se bornant à employer le béton assez ferme; en le contenant par des lattes pendant la construction; et en ayant soin de le maintenir dans un état d'humidité qui empêche la dessiccation trop rapide et les gerçures.

On a fait des voûtes en béton d'une grande portée, en France et en Angleterre, des radiers d'écluses, etc., etc. ( voir les *Annales des ponts et chaussées* de 1835 ); et il est évident que, suivant la vitesse de prise et l'énergie des mortiers hydrauliques, on peut réduire de beaucoup le temps de la construction, et hâter l'époque de la mise en service.

L'homogénéité de cette substance en fait le meilleur obstacle à l'infiltration des eaux à travers les maçonneries soumises à des pressions d'eau extérieures. L'exemple récent le plus remarquable de son emploi est dans la nouvelle forme de radoub en construction à Toulon, où M. l'Ingénieur en chef *Bernard*, s'est servi, comme d'un batardeau contre les eaux extérieures, de murs en béton, qui doivent former, ultérieurement, parties intégrantes des maçonneries définitives de ce bassin.

### *Des Mastics bitumineux et autres.*

Les mastics dont on fait usage dans les constructions ont principalement pour objet de souder rapidement les matériaux de même nature ou de nature différente, de manière à ce que rien ne puisse passer entre eux, et qu'ils forment comme un seul corps.

Les mastics bitumineux de Seyssel, Lobsann, Dax, et autres, sont des produits retirés du sein des mines et convenablement préparés.

On fabrique aussi des mastics bitumineux avec les goudrons minéraux provenant de la distillation du gaz d'éclairage, en mélangeant ceux-ci par la fusion avec des pierres calcaires ou de la chaux, du sable et du gravier, et du brai sec (voir une note de M. l'Ingénieur en chef Leblanc dans les *Annales des ponts et chaussées* de 1837).

Leur emploi s'est beaucoup étendu depuis quelques années, et se serait étendu encore davantage, sans la nécessité d'employer le feu et des fourneaux amovibles pour leur mise en place, et sans leur combustibilité. L'expérience des trottoirs des boulevarts et du Pont-Royal à Paris, a prouvé que le mastic bitumineux, employé en couches minces et saupoudré de sable à la surface, n'éprouve aucune altération par les changements de température, résiste à la pression et aux chocs, ne forme point de boue et est d'une extrême douceur pour la marche. Aux trottoirs du nouveau pont des Saints-Pères, malgré les vibrations très-marquées que le passage des voitures y détermine, ce mastic n'a éprouvé aucune déliaison. Il a réussi dans la substitution aux planchers en bois des salles du bagne de Toulon, et a parfaitement résisté au frottement des chaînes et autres fers des condamnés.

L'on construit à Paris en ce moment, et avec beaucoup de chances de succès, l'essai de pavages de chaussées pour les voitures, exécutés avec des blocs artificiels, dont le mastic bitumineux est le principal ingrédient. Les joints de ces blocs sont garnis également en mastic. L'imperméabilité de ce pavage le préserve des effets de la gelée sur le pavage ordinaire.

L'aire des terrasses extérieures, formée avec ce mastic et établie sur des charpentes en bois, s'est également conservée intacte.

Le mètre carré de mastic préparé, mis en place, coûte à Paris de 4 fr. 20 c. à 5 fr., non compris l'assiette inférieure en maçonnerie de béton ou autre.

Le mastic bitumineux a été employé, avec succès, pour former des tuyaux de conduite d'eau; seulement l'on pourrait craindre qu'il ne communiquât à de l'eau d'alimentation, un goût et une odeur désagréables.

Enfin, il a été mélangé par la fusion avec divers ingrédients, tels que la chaux, le soufre, la résine, la cire jaune et l'albumine, pour coller des surfaces de pierres et autres matériaux, et pour remplacer le plâtre dans les scellements du fer.

Déjà M. Vicat avait obtenu de véritables mortiers par le mélange du goudron ordinaire avec la chaux.

Les plâtres-ciments, dont il a été question, conviendraient aussi aux ouvrages ci-dessus indiqués ; mais leur facile altération par le temps, la crainte de gélivité pour quelques-uns, et le moins prompt durcissement, peuvent dans quelques cas, leur faire préférer les mastics bitumineux seuls ou mélangés, malgré l'emploi préalable du feu qu'exigent ces derniers.

Toutefois les plâtres-ciments l'emportent pour les rejointoiements, et enduits sur des murs imprégnés d'humidité saline. On les a vus, en effet, réussir dans les ports de mer, sur des parois où le mastic de Dyle avait échoué.

On connait encore comme mastics pour lier le fer avec lui-même, le mastic dit de *fontainier*, le minium épaissi, et le fer oxidé par les acides.

---

## RÉSUMÉ DE LA SIXIÈME LEÇON.

DU BOIS SOUS LES RAPPORTS DE SA STRUCTURE, CULTURE, ET CONSERVATION. — DES MOYENS DE LE PLIER ET DE L'ASSEMBLER.

---

### *Structure et culture du bois.*

Les bois sont employés dans la construction des édifices, ou comme parties intégrantes de ces édifices, ou simplement comme moyens d'exécution.

Comme parties intégrantes, ils servent à établir les fondations sur un sol qui n'offre pas une résistance suffisante; on en fait la charpente des planchers, celle des combles; on les emploie à la construction des escaliers et à la menuiserie qui décore l'intérieur des édifices. On fait également usage du bois pour la construction des ponts en charpente, pour celle des estacades; enfin, ils servent à une grande quantité d'ouvrages, pour l'exécution desquels ils remplacent la maçonnerie, soit par des motifs d'économie dans les dépenses, soit par le désir d'une prompte jouissance, ou tout autre motif.

Comme moyens d'exécution, les bois sont employés à former les échafauds, les cintres, les ponts de service, les batardeaux, et ils sont d'un usage aussi fréquent qu'indispensable dans l'art de bâtir.

Pour l'économie des bois, qui, de jour en jour, deviennent plus rares, il est nécessaire :

1° Que les charpentes en général soient composées de bois sains et d'une durée relative à leur destination ;

2° Que les pièces soient disposées de la manière la plus avantageuse ;

3° Enfin, que les dimensions en soient calculées d'après les fonctions de résistance qu'elles doivent remplir.

Nous allons nous occuper des bois sous le rapport de ces trois considérations importantes.

Parmi les diverses espèces de bois propres à la construction des édifices, on distingue le chêne, comme réunissant au plus haut degré toutes les qualités nécessaires à la durée et à la solidité. On lui substitue souvent avec économie l'orme, le châtaignier et le sapin du Nord, pour les ouvrages exposés à l'air, comme pour ceux qui sont toujours immergés ou alternativement immergés et émergés.

Le hêtre et le sapin du pays, même le peuplier et le tilleul, peuvent remplacer le chêne, en ayant égard toutefois à leurs résistance relative, dans toutes les construtions immergées.

Le hêtre est employé avec succès pour les constructions exposées habituellement à une grande chaleur.

Enfin, le *sapin du pays* est susceptible d'un bon emploi à l'air, mais à la condition d'être à l'abri de l'humidité des lieux bas, des pluies, et d'être bien ventilé.

Les botanistes distinguent un grand nombre de variétés dans l'espèce des chênes; il suffira, pour notre objet, d'examiner la première des deux variétés principales comme comprenant les bois de chêne les plus propres à la charpente. Du chêne.

Cette première variété est celle qui porte des glands à longs pédicules.

Elle se divise en deux sous-variétés; la première produit la plus belle qualité de bois. Elle comprend les chênes à gros glands, solitaires ou groupés deux à deux tout au plus; la feuille est grande; le bois, d'un blanc jaunâtre, est liant, ferme, aisé à fendre; l'écorce est lisse et grisâtre. Cette sous-variété croît dans les bons terrains dont la couche de terre végétale a de la profondeur.

La deuxième sous-variété porte de petits glands réunis par bouquets de 3, 4 ou 5 ensemble. La feuille est petite; la couleur du bois et de son écorce est plus foncée, l'écorce est moins lisse et présente des gerçures. L'accroissement est lent. Cette sous-variété ne croît que dans les terrains maigres dont le sol est pierreux.

Le bois de la première sous-variété ressemble beaucoup à celui du châtaignier par la contexture de ses fibres et par sa couleur, circonstance qui fait que l'on prend quelquefois d'anciennes charpentes faites avec ce bois pour du châtaignier. Il se conserve très-bien, et en général on le préfère aux autres variétés et sous-variétés, parce qu'il fournit plus de cœur de bois, moins d'aubier, et que ses fibres sont droites et très-élastiques.

La deuxième sous-variété, celle à petits glands, donne un bois d'une pesanteur spécifique plus considérable que la première; il est plus dur, mais moins droit; ses fibres sont souvent torses, presque toujours coupées par des nœuds, ce qui le rend difficile à travailler, et sujet à se gercer lorsqu'il est débité; mais il est généralement plus durable que le premier.

Toutes les autres variétés et sous-variétés du chêne ressemblent plus ou moins aux deux dont nous venons de donner les principaux caractères. Ainsi il suffira, pour notre objet, d'adopter, pour division générale des bois de chêne, celle que les constructeurs, d'accord à cet égard avec les botanistes, ont établie et qui les classe en chêne blanc ou à gros glands, moins pesant, moins dur, plus facile à travailler que le chêne à petits glands, qui a les qualités opposées.

Cette division annonce les diverses applications que ces deux classes de bois doivent recevoir relativement à leurs qualités.

La première classe servira avec avantage pour les grandes charpentes des combles, des planchers, pour la menuiserie et tous les ouvrages de l'intérieur.

La deuxième sera employée utilement aux fondations des édifices, à la construction des ponts et à toutes les constructions extérieures exposées à l'intempérie des saisons.

Ces applications utiles et propres à ces deux classes de bois, ne peuvent avoir lieu que dans les localités où elles croissent, ou dans les villes maritimes très-commerçantes, dans lesquelles y a des chantiers bien approvisionnés. Souvent l'on est obligé, par des circonstances de localités, d'employer la sous-variété que le pays produit, quoique les ouvrages exigent

l'autre, qu'on ne pourrait obtenir qu'à des frais trop considérables.

Des définitions des principales parties d'un arbre en général, et l'explication des qualités et des défauts des bois, sont nécessaires avant d'examiner les questions relatives à leur résistance et à leur emploi.

*Le tronc* de l'arbre est la partie essentiellement propre à la charpente; il est composé de l'écorce, de l'aubier et des fibres ligneuses dont l'assemblage forme ce qu'on appelle le bois proprement dit. Structure des bois.

*L'écorce* est composée de différentes couches *corticales*; on distingue dans l'écorce le *liber* et l'*épiderme*.

Le *liber* est la partie intérieure de l'écorce qui touche à l'aubier.

L'*épiderme* est l'enveloppe générale extérieure qui recouvre l'écorce.

Les naturalistes trouvent dans l'écorce une disposition admirable d'organes essentiels à la vie des végétaux; mais, considérée sous le rapport qui nous intéresse, l'écorce est une substance molle, remplie de gerçures, et qui n'est nullement propre aux constructions. On a soin de l'enlever aux pièces destinées à la charpente. Cette substance n'ajoute rien à la force de résistance des bois, au contraire, elle leur est nuisible en ce qu'elle accélère leur pourriture lorsque ces bois sont exposés aux intempéries de l'air. On pourrait être tenté de laisser l'écorce aux pilots des fondations, puisque leur position les met à l'abri de l'inconvénient de la pourriture; mais l'écorce dont la surface extérieure est raboteuse, s'oppose à l'enfoncement des pilots, en augmentant le frottement contre le terrain. Ainsi, sous tous les rapports, il est avantageux d'en dépouiller les bois de charpente.

*L'aubier* est une couronne de bois tendre qui n'a point encore acquis la solidité et la dureté nécessaires pour en former le *cœur de bois* dont il fera ultérieurement partie. C'est du bois imparfait; il est placé sous l'écorce, et touche au *cœur de bois* auquel il s'incorpore successivement en s'identifiant avec lui.

Dans la méthode ordinaire d'exploitation, il est important, pour la durée de la charpente, d'enlever l'aubier. Ce procédé est fondé sur ce que, d'une part, cette partie de bois imparfait est très-tendre, et de l'autre, parce qu'elle s'échauffe et se décompose en peu de temps. C'est d'ailleurs dans l'aubier que la mouche dépose ses œufs, origine des vers qui percent l'aubier et attaquent le bois. On verra ci-après que, par la nouvelle méthode d'exploitation, on peut tirer un parti avantageux de l'aubier, et faire disparaître les inconvénients de cette substance.

Le bois proprement dit, ou *cœur de bois*, est la partie des couches ligneuses qui constituent le bois parfait, et qui se recouvrent concentriquement depuis l'aubier jusqu'au centre de l'arbre où se trouve la moelle. Il est formé par l'assemblage des fibres longitudinales et transversales qui croisent ces premières.

La moelle n'est sensible, dans le chêne, que lorsque l'arbre est jeune; elle se dessèche à mesure qu'il vieillit, et à peine en voit-on la trace dans ceux que l'âge et leur grosseur rendent propres à la charpente.

Culture des bois. Les divers sols, le climat et l'exposition occasionnent des différences sensibles dans les bois de charpente; elles sont indépendantes de l'espèce et de la variété de l'arbre qui les produit.

Le chêne qui végète dans un sol humide donne un bois qu'on appelle *gras*; il est léger, ses fibres sont molles, capables d'une moins forte résistance que celui qui a crû dans une terre franche peu humide. Cette dernière espèce de bois est d'une belle venue, ses fibres sont pleines, serrées, élastiques, et il se conserve longtemps dans l'eau.

Lorsque, sous une légère couche de terre, l'arbre trouve un sol pierreux, le bois qu'il produit est de bonne qualité et durable, mais la végétation est plus lente.

Ces deux dernières espèces de bois ont la propriété de prendre une courbure considérable avant de rompre, tandis qn'au contraire le bois *gras* éclate et se brise au moment où l'excès du fardeau qu'il supporte commence à le faire plier.

Le chêne qui végète dans les pays chauds est en général plus dur, plus élastique et plus durable que celui qui a crû dans les pays froids. L'observation établit que les extrêmes de ces deux températures ne sont pas favorables à la croissance du chêne. On ne trouve point cette espèce d'arbre dans la zone torride; les climats glacés n'en produisent point non plus. La température de 40 à 45 degrés est celle qui est la plus favorable pour la sous-variété la plus dure, celle à petits glands; le milieu et le nord de la France et de l'Allemagne produisent la belle sous-variété à gros glands.

L'exposition au nord et au levant est favorable pour des terres sèches et légères; dans les terres fortes et humides, l'exposition au midi est celle où le chêne végète le mieux. L'exposition au couchant est la moins favorable de toutes, quelle que soit d'ailleurs la nature du sol. C'est en effet celle qui est la plus exposée au vent et à la pluie, circonstances qui oc-

casionnent aux arbres des accidents et des maladies qui altèrent la qualité du bois.

La situation de la forêt, par rapport au plus ou au moins d'élévation du sol, apporte encore quelques modifications à la qualité du bois. On remarque dans celles qui couronnent le sommet des montagnes, que les arbres battus par les vents sont ordinairement tortus, rabougris; celles à mi-côte sont à l'abri des accidents auxquels celles placées sur les sommets sont exposées; la terre végétale y est d'ailleurs plus abondante, et l'observation générale établit que c'est dans cette position des forêts que croissent les plus beaux arbres, les mieux filés, les plus sains.

Dans le fond des vallées les arbres sont également d'une belle venue, mais le bois est ordinairement *gras*.

La position de l'arbre dans la forêt apporte encore quelques différences dans la qualité des bois. Ceux qui sont placés sur les lisières, ainsi que ceux qui végètent isolés et dans des places vides, acquièrent beaucoup plus de grosseur que leurs contemporains pressés dans la forêt; mais sous cette belle apparence les premiers donnent ordinairement un bois de mauvaise qualité.

Les vices ou défauts du bois de toute dénomination sont désignés dans l'Art de bâtir par les dénominations de bois *gelifs*, *noueux*, *rebours*, *roulés*, *tranchés*, *carriés*, *moulinés*, enfin du bois *sur le retour*. Vices generaux du bois.

Le bois est *gélif* lorsqu'on aperçoit dans la coupe transversale du tronc, des fentes en forme de rayon qui s'étendent du centre à la circonférence. Si ces fentes sont très-nombreuses, le bois est ce qu'on appelle *cadrané* ou *étoilé*, c'est le dernier terme de ce défaut essentiel qui provient des fortes gelées qui font fendre les arbres sur pied, et séparent ainsi les fibres ligneuses. Ce défaut doit faire rejeter les pièces qui en sont attaquées: elles ne peuvent servir pour les charpentes.

Le bois est *noueux* lorsqu'il provient d'un arbre qui avait un grand nombre de branches insérées sur le tronc. Ce bois n'est pas propre à la charpente intérieure ni à la menuiserie; il est difficile à travailler à cause de l'inégalité de dureté qu'il présente à l'outil; mais un bois noueux, lorsqu'il est sain, peut être employé pour les constructions hydrauliques et civiles, et pour les fondations des ouvrages, lorsqu'on n'est pas obligé de le refendre.

Le bois *rebours* est celui dont l'ordre et la disposition ordinaire des fibres longitudinales et transversales est troublé, ce qui occasionne à ces

fibres diverses directions et en tous sens. Ce défaut a de l'analogie avec le précédent, et l'emploi des bois qui en sont affectés peut être le même.

La *roulure* se reconnait facilement par des fentes concentriques qui séparent les couches annuelles du bois, et auxquelles ces fentes sont parallèles. Ce vice, qui est occasionné à l'arbre sur pied par les vents violents qui ont lieu pendant la séve, augmente lorsque l'arbre coupé se dessèche. Il est quelquefois porté à un tel point, qu'une couronne de bois peut, par un faible effort, être détachée du noyau de l'arbre qui est sain. A ce défaut se joint ordinairement celui de la pourriture, qui en est la suite. La pièce qui en est attaquée ne peut être employée dans aucune espèce de charpente.

Le bois *tranché* est celui dont les fibres sont dérangées et altérées par l'insertion irrégulière de nœuds qui les désunissent. En débitant ce bois, la scie tranche divers faisceaux de fibres, ce qui diminue singulièrement la force du bois. Ce défaut, qui fait rejeter ce bois de la charpente intérieure, n'empêche cependant pas qu'on ne puisse l'employer aux fondations, dont la main-d'œuvre des pièces n'exige qu'un simple équarrissage.

La *carie*, la *moulinure*, indiquent les différents degrés de la pourriture ou décomposition du bois; le bois est mouliné lorsqu'il est piqué par les vers. On aperçoit des taches blanchâtres que les ouvriers nomment *blancs de chapon*, lorsque la décomposition du bois commence; enfin le bois est carié lorsque la pourriture est parvenue au dernier terme, et que le bois sans consistance se réduit en poussière. Ces défauts sont capitaux; les bois qui en sont atteints, surtout au dernier terme, doivent être rejetés de toute espèce de construction. La piqûre de l'insecte nommé *ymexilon navale* est transversale aux fibres. Les *termites* de Rochefort rongent au contraire le bois dans l'intérieur et dans le sens des fibres.

Le *bois sur le retour* est celui qui, après avoir dépéri longtemps, est mort sur pied. L'altération du bois, dans cette circonstance, commence par le centre de l'arbre; les fibres se désunissent, et le bois a bien moins de force que celui qui a été abattu dans la vigueur de l'âge. On ne reconnaît ce défaut des bois que lorsque l'arbre est encore sur pied; on remarque que sa cime est couronnée, que les feuilles des branches inférieures poussent de bonne heure, mais qu'elles tombent avant l'automne; l'écorce est chargée de mousse, de lichens et d'autres plantes parasites. Tels sont les caractères par lesquels ce vice est signalé. Le bois *sur le retour* ne vaut rien pour les charpentes.

Comme la durée des bois et leur force de résistance importent à l'art des constructions, l'on a cherché, par différentes méthodes d'abattage et d'écorcement des arbres, à leur procurer au plus haut degré ces deux qualités essentielles.

Coupe des bois.

Les anciennes ordonnances restreignent à l'hiver la saison propre à l'abattage des arbres; cependant les expériences de Duhamel et les bons résultats qu'il a obtenus pour la force et la durée des bois qu'il a fait abattre dans les mois de juin et de juillet, tendent à prouver que l'été n'est pas moins favorable que l'hiver à cette opération. Une observation de ce savant milite en faveur de cette opinion, c'est celle de la moindre pesanteur des bois pendant les mois d'été, et qui est d'environ $\frac{1}{8}$ moindre que pendant l'hiver; résultat qu'il attribue à une moindre quantité d'humidité. Malgré ces expériences de Duhamel, l'ancien usage de n'abattre qu'en hiver prévaut toujours, et il faut reconnaitre que cette méthode a au moins l'avantage d'occasionner moins de dommages aux forêts que si leur exploitation avait lieu pendant l'été.

Quant aux époques des coupes plus ou moins favorables, relativement aux diverses phases de la lune, on ne croit plus aujourd'hui à son influence à cet égard; et l'on sait que le chêne abattu en nouvelle lune se conserve aussi bien que celui qui a été coupé en décours.

Il est essentiel, pour la conservation des bois, si les arbres ont été coupés en été, de ne pas les laisser longtemps en *grume*, c'est-à-dire revêtus de l'écorce. Il faut écorcer immédiatement après l'abattage. L'expérience a appris que la sève est une liqueur prompte à se corrompre; il est donc urgent d'employer les moyens les plus propres pour opérer la dessiccation des bois et l'évaporation de la sève : par l'écorcement on accélère cet effet.

Vitruve et quelques autres auteurs ont écrit qu'on augmentait la densité, et par conséquent la force des bois, en faisant mourir sur pied un arbre sain et vigoureux, soit en mutilant l'écorce, soit enfin en entaillant profondément le tronc de l'arbre vers la racine.

Duhamel et Buffon ont fait des expériences pour connaitre les véritables résultats que l'on obtient par ces deux méthodes, connues et pratiquées par les anciens.

Ces physiciens ont reconnu qu'une entaille circulaire et profonde au pied de l'arbre, occasionnait bien plutôt sa mort que l'enlèvement partiel et même total de l'écorce; celui-ci prolonge la végétation de l'arbre pendant près d'une année. L'opération de l'entaille interrompt en totalité le cours

de la séve, tandis que l'écorcement ne l'arrête pas entièrement : elle continue de circuler au moyen de l'aubier, qu'elle durcit singulièrement.

Cette observation doit faire préférer la méthode d'écorcement. L'usage en est établi depuis longtemps en Allemagne et en Angleterre, où l'on écorce sur pied, pendant la séve du printemps, les arbres destinés à être coupés ; on les laisse ainsi végéter, ou pour mieux dire, sécher sur pied jusqu'à l'hiver suivant, époque à laquelle ils sont abattus.

D'après les expériences de Buffon, des chênes de 70 ans d'âge, écorcés au printemps depuis le sommet de la tige jusqu'au pied, n'éprouvent aucune altération sensible pendant deux mois ; quelque temps après les feuilles jaunissent, et tombent vers la fin de juillet, époque à laquelle la séve cesse de couler. L'un de ces arbres écorcés fut abattu à cette époque ; le bois était d'une grande dureté, et l'aubier avait acquis une densité égale à celle du cœur de bois.

Au printemps suivant, la végétation des autres chênes d'expérience laissés sur pied, devança celle des autres arbres de la forêt ; mais ils étaient languissants, et ils perdirent leurs feuilles dans le mois d'août. Ces arbres furent abattus à mesure qu'ils se dépouillaient, et leurs bois, ainsi que l'aubier, qui avaient une grande dureté, ont été soumis à des épreuves comparatives avec des bois exploités à la manière ordinaire, et qui étaient semblables pour l'âge, la grosseur et les qualités apparentes.

Ces épreuves comparatives ont eu lieu sur des pièces de dimensions égales et cubant ( $0^m$,103 ) une solive ou trois pieds cubes.

| NUMÉROS des pièces. | INDICATION DES PIÈCES D'ÉPREUVE. | PESANTEUR absolue. | PRESSION supportée avant de rompre. |
|---|---|---|---|
| 1 | Pièce de 3 pieds cubes ($0^m$,103), provenant d'un arbre écorcé sur pied . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . | liv. 242 ($118^k$,4) | liv. 7940 ($3886^k$,6) |
| 2 | Pièce des mêmes dimensions, provenant d'un arbre non écorcé, et exploité à la manière ordinaire. . . . . . | 234 ($114^k$,50) | 7320 ($3583^k$,20) |
| 3 | Pièce, mêmes dimensions, arbre écorcé . . . . . . . . | 249 ($121^k$,80) | 8252 ($4014^k$,2) |
| 4 | Pièce, mêmes dimensions, non écorcée. . . . . . . . . | 236 ($115^k$,50) | 7383 ($3614^k$) |
| | Pièce, barreau d'aubier, de 3 pieds ($0^m$,974) de longueur sur 1 pouce d'équarrissage ($0,^m027$), arbre écorcé. . . | liv. onc. 1 7 $\frac{9}{1}$ ($0^k$,774) | 287 ($140^k$,50) |
| 6 | Pièce, barreau de cœur de bois, mêmes dimensions, arbre non écorcé . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . | 1 9 $\frac{1}{1}$ | 255 ($125^k$,30) |

On doit conclure de ces expériences :

1° Que la pesanteur absolue du chêne écorcé excède d'environ $\frac{6}{100}$ celle du corps non écorcé.

2° Que la force de résistance du chêne écorcé est à celle du chêne non écorcé dans le rapport de 81 à 74.

3° Que l'aubier de l'arbre écorcé est un peu moins pesant que le bois du chêne non écorcé.

4° Enfin, que la force de résistance entre l'aubier écorcé et le bois non écorcé est dans le rapport de 28 à 25.

Ces conclusions sont décisives, et à l'avantage de la méthode de l'écorcement des arbres pendant la séve, et qui précède d'une année leur abattage.

### *Conservation et mise en œuvre du bois.*

Dans les chantiers de grands travaux permanents, l'on est forcé de s'approvisionner longtemps à l'avance des diverses essences de bois, afin d'avoir toujours un vaste assortiment de pièces de toutes configurations et dimensions, qui répondent à tous les besoins prévus et imprévus.

Il a fallu dès lors étudier les moyens de les conserver jusqu'au moment de la mise en œuvre. Le bois s'altère par la propagation d'un commencement de pourriture, ou par une décomposition qui se manifeste soit pendant qu'il est en dépôt, soit après son emploi. L'air non renouvelé, chaud et saturé d'humidité atmosphérique ou autre, paraît le véhicule le plus actif de ces deux genres d'altération. L'on a cherché à en garantir les bois par les divers procédés suivants :

Après avoir retranché toutes les parties défectueuses, *vidé* tous les nœuds extérieurs dans les bois vicieux, et particulièrement dans le chêne; l'on remplit ces nœuds d'une épaisse couche de goudron qui prévient les infiltrations pluviales. Puis l'on place ces bois transversalement ou longitudinalement sous des hangars fixes, où ils sont empilés à partir de 80 centimètres au-dessus du sol, sur 4 à 5 mètres de hauteur, mais de manière à être isolés par de petites lattes ou cales. L'on garantit les bois contre une dessiccation trop violente par une parois à faux-frais, faite avec des croûtes ou enlevures provenant du sciage des bois. Le plus souvent l'on empile les bois en plein air, en les rangeant par catégories et dimensions principales, et les couvrant par des toitures *amovibles* en planches ou toiles goudronnées, que la pile porte elle-même. L'on maintient

aussi les bois à flot et en radeaux ou trains, en abritant contre les vicissitudes atmosphériques les parties émergées de leurs périmètres par de petits toits en planches.

Dans les rivières ou étangs d'eau douce, ou bien dans les rivières et étangs débouchant à la mer ( mais alors seulement dans les zônes où l'eau douce est en forte proportion relativement à l'eau salée) l'on tient les bois complétement immergés, par *trains*, soit en les chargeant de pierres ou de saumons de fonte, soit en les enclavant sous des piquets. Les piquets sont fichés dans le sol ou tenus sous des murailles en maçonnerie. Leur adhérence ou le poids des maçonnerie font équilibre à la tendance qu'ont les bois non foudriers à émerger : l'on trouvera des détails sur cet objet dans la dernière partie de ce résumé.

Enfin, l'on a cherché à conserver les bois en les enfouissant, tantôt sous la vase des lagunes couvertes par la mer, tantôt hors de l'eau, mais sous le sable ou la terre végétale.

On n'est pas encore fixé sur la prééminence de l'un quelconque de ces moyens.

La durée pendant plusieurs siècles de charpentes de vieux édifices publics et particuliers, dans des localités, où le bois était exposé à un air constamment renouvelé, semble prouver que l'emmagasinage du bois à l'air sous des hangars convient : pour les bois de chêne qui ne sont point *gras;* pour le châtaignier; pour les sapins à grains fins; et pour l'orme.

Toutefois, les *termites*, à Rochefort, détruisent le bois exposé à l'air, en le rongeant longitudinalement; et un autre ver, importé des forêts (*imexilon navale*), pique dans les mêmes circonstances le bois transversalement à ses fibres, et pullule dans les grands dépôts de bois de la plupart des arsenaux de la marine. Pour échapper à cette cause de dommage, on avait eu recours à l'immersion des bois dans l'eau. Cette dernière convient d'ailleurs exclusivement pour les bois de chêne *gras*, les hêtres, et même est préférable à l'exposition à l'air pour les sapins du *pays* et les châtaigniers.

Mais les bois, en les supposant même conservés intacts pendant leur immersion, n'y contractent-ils pas une humidité hygrométrique, qui hâte plus tard la pourriture de ceux d'entre eux qui seraient ultérieurement employés hors *du contact de l'eau?* Ce doute n'a pas encore été résolu.

De plus, dans la plupart des ports de mer, les communications avec l'Inde ont importé le ver marin ( *taret*), qui en peu d'années ronge et dévore les bois immergés dans l'eau de mer, lorsqu'elle n'est pas mélangée

avec une quantité considérable d'eau douce; ou lorsque les bois, dans les ports de l'Ouest, ne sont pas immergés, au-dessus du niveau des hautes mers de morte eau, c'est-à-dire à un niveau tel qu'ils découvrent à chaque marée. Cette dernière circonstance suffit en effet pour arrêter la marche du taret.

L'enfouissement des bois sous la terre, le sable et la vase, les préserve à la vérité de toute espèce de vers, et les conserve; mais il est à craindre également que ceux de ces bois, qui doivent être mis en œuvre et placés hors *du contact de l'eau*, n'éprouvent ensuite une altération rapide; d'ailleurs ce procédé est coûteux par les mains-d'œuvre qu'il exige.

On a proposé de recouvrir ou imbiber les bois en dépôt, ou après leur mise en œuvre, de diverses préparations propres à assurer leur durée. Les préparations mercurielles ont entre autres présenté de très-beaux résultats; mais ces moyens sont encore trop dispendieux pour qu'ils puissent être appliqués sur une grande échelle.

Conservation des ouvrages en bois.

Les bois après leur mise en œuvre sont exposés à toutes les causes de destruction indiquées précédemment.

On peut voir dans une note de M. l'Ingénieur Sganzin, insérée aux *Annales maritimes* de 1835, et aux *Annales des ponts et chaussées* de 1836, que des enveloppes faites en feuilles de zinc, ou des enduits en *plâtre ciment* liés à la surface par des petits clous en échiquier, sont le mode le plus sûr et le plus économique de protéger les bois œuvrés contre les ravages des vers marins, et même contre les vicissitudes atmosphériques.

Les bois, même dans l'intérieur des édifices, peuvent éprouver une pourriture partielle, si leur sève ou l'humidité croupit dans leur assemblage; et si les extrémités de ces bois sont engagées dans des maçonneries humides soit par leur récente exécution, soit par leur exposition aux vents pluvieux. Il est de la plus haute importance de mettre du blanc de céruse ou minium épaissi dans ces assemblages; de faire déboucher à l'air extérieur les extrémités des bois, ou au moins de les protéger par des mastics, des feuilles métalliques, de l'écorce de bouleau, ou des feuilles de papier goudronné. De plus, et comme surcroît de précaution, il convient d'avoir à l'intérieur des murs d'établissement, de petits corbelets saillants en pierre ou en fonte de fer pour retenir les poutres, même si leurs portées engagées dans les murs pourrissaient.

On renvoye pour plus de détails, sur la conservation des bois, à un ouvrage traduit de l'anglais de Knoxles; à divers articles de M. Kéraudren, In-

specteur général du service de santé de la marine, et d'officiers du génie maritime, insérés aux *Annales maritimes* et coloniales de 1816 à 1838.

Pliage des bois. Dans les ouvrages où l'on a besoin de plier du bois suivant des formes curvilignes, on emploie, pour les planches d'une faible épaisseur, leur immersion pendant une couple d'heures dans l'eau bouillante, ou bien on les expose à une certaine distance du feu qui les fait ainsi voiler. On trouve des détails à ce sujet dans des articles insérés aux *Annales des ponts et chaussées* de 1831, par MM. Eustache, et Emery, Inspecteur divisionnaire, et Ingénieur en chef des ponts et chaussées. Mais ces moyens seraient insuffisants pour rendre flexibles des pièces de bois de 16 à 20 centimètres d'épaisseur. L'on se sert alors d'étuves à vapeur amovibles et fermées à volonté, où le bois reste pendant 6 à 7 heures en contact avec de la vapeur d'eau, à une tension plus grande qu'une atmosphère. On peut voir dans les *Annales maritimes* de 1825 et *celles des ponts et chaussées* de 1831 déjà citées, la description des étuves de ce genre employées aujourd'hui dans les ports militaires, et imaginées par M. *Ledéan* officier supérieur du génie maritime.

Figures 14 des planches.

Figures 15 des planches.

Composition artificielle des pièces de bois. La rareté croissante et le prix élevé des bois de grandes dimensions dans presque toutes les essences, ont forcé de composer artificiellement des pièces de diverses configurations.

L'assemblage actuel des parties élémentaires des mâts et vergues des bâtiments de guerre, à l'aide de dés cylindriques en bois dur posés en échiquier et engagés par moitié dans les faces des pièces de bois en contact; le système de composition des murailles des navires de commerce et de guerre, sont d'excellents modèles à suivre pour rendre les bois d'assemblage solidaires dans les deux sens de la longueur et du travers. (*Voir dans les annales maritimes et coloniales de 1832, le mémoire sur un nouveau système de construction des vaisseaux et frégates, publié par M. Boucher, aujourd'hui inspecteur-général du génie maritime.*)

Figures 16 des planches.

Philibert Delorme a formé de véritables poutres en accollant et réunissant par leur surface longitudinale, et à l'aide de petites clefs transversales, de clous et de petits boulons, des planches droites et curvilignes, de 2 à 3 mètres de longueur au plus, et en les disposant en sorte que les abouts d'un des rangs de planches correspondissent toujours à des pleins dans le rang voisin. Ce système a été ensuite étendu à des réunions de pièces équarries. (*Voir les ouvrages de Philibert Delorme, et les dessins des charpentes des cales ouvertes de Brest et de Lorient, de plusieurs grands ponts*

Figures 17 des planches.

Figures 18 des planches.

*en charpente, dans la collect. lithographique de l'école des ponts et chaussées.*)

M. Émy, profitant de la flexibilité de planches minces très-longues, les a superposées l'une sur l'autre comme des lames de ressorts de voitures, et est parvenu à former ainsi de vastes cintres, maintenus par des boulons et des étriers en fer, et susceptibles de servir, soit pour de grandes charpentes d'établissements à terre, soit à des ponts ou autres ouvrages en charpente. (Voir les ouvrages de M. Émy sur la charpenterie, et la note qui y est relative, dans les *Annales des ponts et chaussées* de 1831.) Figures 19 des planches.

---

## RÉSUMÉ DE LA SEPTIÈME LEÇON.

DE LA RÉSISTANCE DES PIÈCES DE BOIS DE DIVERSES ESSENCES, ET DES ASSEMBLAGES DE CES PIÈCES DANS LEURS DIVERSES POSITIONS RELATIVEMENT AUX CHARGES A SUPPORTER.

L'étude des bois, sous le rapport de leur résistance dans les diverses positions où les pièces se trouvent dans les assemblages de charpenterie, est une des plus essentielles de celles qui intéressent l'art des constructions.

L'historique de la marche de la science à cet égard ne peut qu'être utile, et doit précéder l'exposition des expériences plus récentes.

Galilée, qui dans le cours du 17ᵉ siècle posa les fondements de la physique moderne, est le premier qui ait appliqué les lois de la mécanique à la résistance des solides en général. Il a envisagé les solides comme composés de fibres appliquées les unes sur les autres parallèlement; et il a recherché d'abord quelle était l'expression de la force avec laquelle les corps résistent à l'action d'une puissance qui tend à allonger leurs fibres en les tirant dans le sens de leur longueur; il a trouvé que leur résistance était proportionnelle au nombre des fibres intégrantes. Considérant ensuite les corps réunis à l'action d'une force perpendiculaire à leur longueur, il a démontré facilement que, dans cette nouvelle position, la résistance était proportionnelle à la somme des fibres intégrantes, multipliée par un bras de levier, qui est toujours une certaine partie de la dimension verticale du solide dans son plan de rupture.

Ces deux principes, posés par cet illustre géomètre, lui ont servi de base dans la solution des problèmes relatifs à la résistance des solides.

Les savants et les mathématiciens les plus célèbres, à la tête desquels on doit placer Leibnitz, se sont occupés, depuis Galilée, de recherches très-

curieuses sur la résistance des solides; et, parmi leurs découvertes, nous ne devons pas omettre celles de Mariotte qui, vers la fin de l'avant-dernier siècle, reconnut que des prismes, solidement engagés par leurs extrémités, étaient capables de supporter, avant de rompre, un poids double de celui qui aurait suffi pour produire leur rupture, si leurs extrémités avaient été libres.

Cette observation faite sur des lames de verre, dont la contexture n'est pas la même que celle du bois, ne paraissait pas devoir être applicable à cette dernière substance. L'académicien Parent, en répétant en 1707 et 1708 les expériences de Mariotte, chercha à reconnaitre si la découverte de ce savant, très-utile pour la pratique, comprenait les bois. Mais les expériences qu'il fit sur des prismes libres et encastrés, ayant eu lieu sur des barreaux de bois de trop petites dimensions, ou ayant manqué de précision, il a trouvé que, dans ce cas, les résistances ne suivaient pas tout à fait la loi de Mariotte.

Malgré l'incertitude de ces expériences, Parent calcula d'après leurs résultats, et en employant la règle de Galilée, confirmée par Leibnitz, des tables qui indiquent la résistance des bois, pour des pièces depuis ($1^m$,195 jusqu'à $11^m$,69) six jusqu'à trente-six pieds de longueur sur ($0^m$,27 à $0^m$,48) dix à dix-huit pouces d'équarrissage.

Bélidor, en 1729, fit de nouvelles expériences sur la résistance des bois; et il se fonda sur ce que les pièces de charpente employées dans les constructions sont presque toujours engagées et fixées solidement, soit dans les murs, soit sur leurs points d'appui, et que dès lors il y avait un motif pressant d'utilité publique de déterminer d'une manière plus précise que l'académicien Parent ne l'avait fait, la loi de leur résistance et de leur rupture dans cette position.

Ces expériences de Bélidor ont encore l'inconvénient d'avoir été faites sur des barreaux de trop petites dimensions; cependant l'examen des résultats, conformes en beaucoup de circonstances à ceux fournis par les expériences de Parent, confirme toujours la loi de Galilée; c'est-à-dire que les pièces résistent en raison directe de la dimension horizontale du plan de fracture, multipliée par le carré de la dimension verticale ou parallèle à la puissance, et en raison inverse de la longueur des pièces.

Les expériences de Bélidor indiquent encore que les pièces encastrées ont un tiers plus de force que celles qui reposent librement sur leurs appuis. Ce dernier résultat, quoique conforme à celui qu'on peut conclure de quelques expériences semblables de Parent, est cependant une erreur.

C'est à Muschenbroeck que l'on doit les premiers résultats exacts sur la résistance et sur la rupture des pièces encastrées. Les expériences que ce célèbre physicien a faites à Leyde, et qu'il a publiées en 1729, établissent que, dans cette position, les pièces étaient capables d'une résistance double de celle qu'elles auraient eue étant simplement appuyées; et que la rupture avait toujours lieu au milieu de la longueur de la pièce, et en même temps contre les points d'appui dans lesquels la pièce est solidement encastrée, résultats conformes aux premières épreuves de Mariotte, et parfaitement d'accord avec la théorie établie ensuite par Euler.

Si les derniers essais de Muschenbroeck nous ont fait faire quelques pas vers la vérité; le soin particulier qu'il a pris pour choisir parmi les corps qu'il a soumis à l'expérience, ceux dont la contexture et l'organisation lui ont paru sans défaut, afin d'éloigner les circonstances accidentelles qui pouvaient altérer les résultats, sont peut-être autant de causes qui les rendent moins utiles à l'art des constructions. Les bois qu'on y emploie sont d'autant moins parfaits que leur volume est plus considérable. Il fallait donc, par une suite d'expériences nombreuses et faites très en grand, obtenir une sorte de module qui, déterminé dans l'hypothèse d'un état moins parfait que celui choisi par le physicien hollandais, servît à calculer plus sûrement dans la pratique la résistance des bois.

Tel était l'état de la science, et tels avaient été les efforts des physiciens, lorsque, par un concours heureux de circonstances, Buffon réunit tous les moyens de faire les expériences en grand, qui avaient manqué à ceux qui l'avaient précédé dans cette carrière.

Ce célèbre naturaliste a soumis à une forte pression, et jusqu'à leur rupture, des pièces de diverses grosseurs, depuis ($1^m,95$) 6 pieds jusqu'à ($9^m,75$) 30 pieds de longueur sur ($0^m,21$ à $0^m,24$) 8 à 9 pouces d'équarrissage: ces dernières expériences forment la partie la plus intéressante de son travail. Il a dressé des tables dans lesquelles il a indiqué le poids de chaque pièce, la charge qu'elle a supportée, et la flèche de courbure, au moment où la pièce de bois se brisait en éclatant sous le poids.

Ce précieux travail, qui assure à jamais à son illustre auteur des droits à notre reconnaissance, est inséré dans les Mémoires de l'académie des sciences, années 1740 et 1741; on le trouve également dans la collection

de ses œuvres, tome VII, édit. in-12 de Paris : on s'est empressé d'en enrichir l'Encyclopédie et plusieurs autres ouvrages.

Mais comme dans les assemblages de charpente il est essentiel : que les pièces conservent les positions primitives ; que l'élasticité du bois ne soit point altérée, et qu'une courbure trop considérable ne change pas la figure du système ; il importe singulièrement à la solidité de la construction de déterminer le rapport des flèches de courbure aux charges qui les produisent, afin d'éviter dans l'emploi des bois les limites extrêmes des flèches de courbure, qui altèrent sensiblement la forme primitive du système, et surtout celles de ces limites qui précèdent l'altération d'élasticité et non la rupture, et qui sont les seules que Buffon a observées.

C'est pour obtenir ce but, qui est en quelque sorte le complément du travail de Buffon, que les Ingénieurs des ponts et chaussées employés aux travaux maritimes du port du Havre, sous la direction de feu Lamblardie père, Ingénieur du premier mérite, qu'une mort prématurée a enlevé aux sciences et aux arts, ont entrepris des expériences en grand sur la résistance absolue négative des bois, c'est-à-dire lorsqu'étant dans une position verticale, ils sont chargés d'un poids qui les comprime dans une direction parallèle à leurs fibres.

Lamblardie avait imaginé à cet effet un grand appareil capable de produire une pression de plus de deux cents milliers, et au moyen de laquelle on parvenait à briser des pièces de ($0^m,21$ à $0^m,24$) 8 à 9 pouces d'équarrissage. Les résultats de ces premières expériences du Havre sont consignés dans les *Mémoires manuscrits de l'École des ponts et chaussées.*

Ces expériences ont été continuées par l'Ingénieur Girard, qui a perfectionné l'appareil, et a conçu l'heureuse idée de les diriger de manière à les faire servir à la détermination de l'élasticité absolue des solides.

Ces recherches et les résultats très-curieux de son travail font partie de l'excellent ouvrage que cet Ingénieur a publié en 1798 sous le titre de *Traité analytique de la résistance des solides, et des solides d'égale résistance*, ouvrage qui renferme la théorie la plus complète sur cette partie de la science.

La limite de la résistance absolue négative des bois, sous le rapport de leur emploi dans les constructions, n'est pas le poids capable de les briser, mais celui sous lequel ils commencent à fléchir, et où leur élasticité commençait à s'altérer. Aussi le but du travail de l'Ingénieur Girard a été de

déterminer la pression qui, comprimant des solides de dimensions données parallèlement à leur longueur, est capable de les faire plier.

On serait porté à croire qu'un solide dont les fibres intégrantes seraient exactement parallèles entre elles, ne devrait point se plier par l'action d'un poids qui agirait parallèlement à la longueur de ces fibres, supposées homogènes. Aucune cause ne parait devoir déterminer leur inflexion dans un sens plutôt que dans l'autre.

Mais il n'en est pas ainsi dans un solide de bois soumis à cette épreuve. Le défaut d'homogénéité parfaite entre les fibres, la moindre différence d'organisation dans ces fibres, déterminent une inflexion qui les entraîne dans le même sens; et tout le système, en vertu de l'adhérence transversale, obéit en cédant à la charge.

Au reste, de quelque manière qu'on cherche à expliquer ce phénomène d'inflexion dans les bois chargés debout, cette inflexion est une vérité d'expérience qu'on ne peut révoquer en doute.

Les expériences de l'Ingénieur Girard ont eu lieu sur un grand nombre de pièces, les unes de bois de sciage, et les autres de bois de brin. Il a dressé des tables fort étendues, dans lesquelles il a indiqué les phénomènes qui pouvaient intéresser l'observateur. Elles expriment la position de la flèche, sa plus grande longueur dans les positions verticale et horizontale des pièces, c'est-à-dire les quantités de résistance négative ou positive qui sont relatives à ces flèches.

Quelques-unes de ces tables présentent l'élasticité absolue des bois, produite par la charge, et en même temps l'expression théorique du poids sous lequel la pièce devrait commencer à fléchir étant chargée debout.

Les trois premières tables de l'ouvrage de l'Ingénieur Girard ont pour objet le bois de chêne. La quatrième comprend les expériences qui ont été faites pour déterminer la résistance relative des bois de sapin et leur élasticité absolue.

Les tables 8 et 9 indiquent l'élasticité absolue moyenne d'un mètre cube de sapin et de chêne : elle est conclue d'un grand nombre d'expériences. Ce résultat donne le rapport de 8161 à 11780, rapport un peu moindre que celui de 47 à 68, indiqué par Perronnet.

C'est dans l'ouvrage même de l'Ingénieur Girard, qu'il est impossible d'analyser, que l'on trouve les considérations aussi neuves qu'intéressantes sur la résistance des bois, et au moyen desquelles on peut calculer les dimensions d'équarrissage, soit pour des résistances absolues, soit enfin,

et ce qui vaut mieux, pour la solidité des constructions, les premières flèches de courbure, qui n'altèrent point l'élasticité, et auxquelles il est toujours prudent de s'arrêter.

Objections recentes sur la résistance des bois, avec ou sans altération d'élasticite.

Depuis lors, des expériences nouvelles sur les bois ont été faites en Angleterre par Barlow, et en France par MM. Charles Dupin et Navier. Elles sont consignées dans les ouvrages de ces deux académiciens, et notamment dans celui de M. Navier, intitulé: *Résumé des leçons données à l'Ecole des ponts et chaussées, sur la résistance des matériaux.*

La résistance à l'écrasement par centimètre carré de section transversale, pour des bois *qui ne peuvent plier* et dont la hauteur ne surpasse pas 7 à 8 fois leur moindre dimension de section transversale, est:

| | Maximum des observations. | Minimum. | Moyenne. |
|---|---|---|---|
| Pour le chêne. . . . . . . . | 463 kil. | 270 kil. | 360 kil. |
| Pour le sapin. . . . . . . . | 538 | 130 | 334 |
| Pour le pin d'Amérique . . | | | 112 |
| Pour l'orme. . . . . . . . . | | | 89 |

Lorsque des pièces s'assemblent par leurs extrémités dans d'autres pièces, par des tenons et mortaises, ou autres assemblages, la pression peut faire refouler les fibres du bois de ces derniers.

M. Gauthey, dans le tome 2, page 44 de la *Construction des ponts*, annonce que, pour qu'il n'y ait pas d'empreinte sensible, la charge par centimètre carré de surface de contact pressée ne doit pas être pour le chêne de plus de 200 kilog., si la direction de la charge est parallèle aux fibres; et de 160 kilog. si elle est perpendiculaire.

La résistance à la traction longitudinale, parallèlement aux fibres, par centimètre carré de section transversale, est presque double de la résistance à la compression; elle est indiquée ci-dessous :

| | Maximum des observations. | Minimum. | Moyenne. |
|---|---|---|---|
| Pour le chêne. . . . . . . . | 981 kil. | 643 kil. | 812 kil. |
| Pour le sapin. . . . . . . . | 899 | 888 | 854 |
| Pour le hêtre. . . . . . . . | | | 802 |
| Pour le frêne . . . . . . . . | 1204 | 1186 | 1195 |
| Pour le tremble. . . . . . . | 700 | 600 | 650 |
| Pour le poirier . . . . . . . | | | 667 |
| Pour le buis . . . . . . . . | | | 1392 |

L'adhésion latérale des fibres du bois, ou la résistance à la séparation com-

plète des fibres par une force *parallèle à leur direction*, a été trouvée pour le sapin de 41 kilog. par centimètre carré de section transversale de la portion de bois à détacher, et pour le tremble de 57 kilog. M. l'Ingénieur en chef Bernard a reconnu qu'en général elle était le dixième de la force de traction.

La force de cohésion des bois tirés *perpendiculairement à la direction des fibres* a été trouvée par centimètre carré de la section longitudinale à détacher :

| | |
|---|---|
| Pour le chêne, de. . . . . . . . . . . | 162 kil. |
| Pour le peuplier, de. . . . . . . . . . | 124 |
| Pour le pin de Larix, de . . . . . . | 68 à 119 |

L'élasticité relative (E), et la résistance (R) à la flexion par centimètre carré, sous un effort dirigé transversalement à la longueur, sont indiquées dans les colonnes E et R du tableau ci-dessous.

| ESSENCES de bois. | PESANTEURS SPÉCIFIQUES. | | | E Force nécessaire pour allonger ou raccourcir un prisme dont la section transversale est 1 cent. carré, d'une quantité égale à sa longueur. | | | R Résistance à la flexion par centimètre carré, sous un effort dirigé transversalement à la longueur. | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Maximum. | Minimum. | Moyenne. | Maximum. | Minimum. | Moyenne. | Maximum. | Minimum. | Moyenne. |
| | | | | kil. | kil. | kil. | kil. | kil. | kil. |
| Chêne . . . | 0,993 | 0,616 | 0,804 | 151000 | 68300 | 109650 | 1219 | 508 | 863 |
| Sapin. . . . | 0,753 | 0,464 | 0,608 | 129300 | 55850 | 92575 | 950 | 454 | 702 |
| Pin. . . . . | 0,622 | 0,396 | 0,509 | 73987 | 43309 | 58648 | 828 | 357 | 592 |
| Hêtre. . . . | 0,696 | 0,690 | 0,693 | » | » | 95896 | 852 | 666 | 759 |
| Frêne. . . . | 0,811 | 0,690 | 0,750 | » | » | 115597 | 1020 | 800 | 910 |
| Orme. . . . | 0,763 | 0,553 | 0 658 | » | » | 49177 | 680 | 437 | 558 |
| Châtaignier. | » | » | 0,875 | » | » | » | » | » | 567 |
| Noyer . . . | » | » | 0,920 | » | » | » | » | » | 613 |
| Bouleau . . | » | » | 0,720 | » | » | » | » | » | 651 |
| Sycomore . | » | » | 0,590 | » | » | » | » | » | 674 |
| Acacia vert. | » | » | 0,820 | » | » | » | » | » | 783 |
| Aune. . . . | » | » | 0,555 | » | » | » | » | » | 667 |
| Platane. . . | » | » | 0,648 | » | » | » | » | » | 764 |
| Saule. . . . | » | » | 0,405 | » | » | » | » | » | 459 |
| Peuplier. . | 0,511 | 0,374 | 0,442 | » | » | » | 718 | 411 | 564 |

La résistance à la torsion, par centimètre carré de section transversale, a été trouvée :

| | Maximum. | Minimum. | Moyenne. |
|---|---|---|---|
| Pour le chêne. . . . . . . . | 405 kil. | 167 kil. | 286 kil. |
| Pour le sapin . . . . . . . . | 310 | 134 | 222 |

Mais dans l'application des formules qui seront relatées *ci-dessous* et pour des charges permanentes, on est généralement convenu qu'il ne

fallait prendre *que le dixième* des chiffres de résistance indiqués ci-dessus, afin de parer aux défauts des bois de grand échantillon ; d'empêcher que l'élasticité ne soit altérée, et surtout à cause du dépérissement des bois par le temps.

Si les bois étaient affaiblis par des nœuds, par des coupures ou entailles, par de nombreux passages de chevilles ou boulons ; suivant la disposition de ces objets dans le bois, et la direction de la charge, il y aurait à ne compter les dimensions qu'*après retranchement fait de ces réductions de force*.

La restriction qu'on vient d'indiquer, sera facilement comprise, si l'on se rappelle ; que dans les bois se courbant sous un effort transversal à leur longueur, les fibres supérieures de la concavité tendent à se comprimer, tandis qu'elles tendent à s'allonger à la convexité inférieure ; et que la résistance au raccourcissement est moindre que celle à l'allongement. Aussi Duhamel du Monceau, ayant scié une pièce de bois sur une partie de sa hauteur du côté de la face concave, et ayant rempli le trait de scie par une cale de bois dur, trouva que la force de la pièce augmentait un peu quand le trait de scie pénétrait jusqu'à $\frac{1}{3}$ de la hauteur ; était la même quand le trait de scie était à moitié ; et un peu diminuée quand il arrivait aux $\frac{3}{4}$ : ainsi les nœuds, coupures, entailles, doivent toujours être placés du côté où la charge tend à raccourcir les fibres. Quant aux passages de chevilles et boulons en fer, il est important de ne pas les ranger tous sur les mêmes lignes, et de les disposer en échiquier.

Les formules de résistance des bois sont :

Formules de résistance.

*Pour les pièces chargées debout dans leur axe :*

*Si les pièces ne peuvent plier :*

C'est-à-dire, si en longueur elles ont moins de 8 fois leur largeur, la charge $P = p.S$ ($p$ étant la résistance par centimètre carré, et S la section minimum).

*Si les pièces peuvent plier :*

Ayant une longueur de 12 à 24 fois leur moindre dimension, la charge d'équarrissage $P = \frac{5}{6} p$ S.

Ayant une longueur de 12 à 24 fois leur moindre dimension, on a $P = \frac{1}{2} p.S$.

Ayant une longueur de 24 à 36 fois leur moindre dimension, $P = \frac{1}{4} p.S$.

Enfin, si leur longueur est 36 à 48 fois leur moindre dimension, $P = \frac{1}{6} p.S$.

*Nota*. (On renvoie à l'ouvrage de Navier, déjà cité, pour les cas où la charge de la pièce est en dehors de son axe.)

Pour les pièces tirées dans le sens de leurs fibres, la charge $P_1 = p_1 S_1$, ($p_1$ et $S_1$ représentant toujours la résistance par centimètre carré et la section minimum.)

Pour les pièces rectangulaires encastrées à une de leurs extrémités, et chargées transversalement à l'autre d'un poids $P_3$ en kilogrammes, on a $P_3 = R.\frac{ab^2}{6l}$ ($a$, $b$, $l$, étant les largeur, hauteur et longueur en centimètres, et R la résistance en kilogrammes par centimètre carré indiquée ci-dessus.)

Pour le cas où les poids sont uniformément répartis, leur somme $P_3 = R\,\frac{ab^2}{3l}$.

Pour une pièce portée sur deux appuis, avec poids $P_3$ au milieu, on a pour formule $P_3 = \frac{2}{3} R \frac{ab^2}{l}$ ($l$ étant ici la distance entre les appuis).

Si la pièce est encastrée à ses deux extrémités, la formule devient $P_3 = \frac{4}{3} R \frac{ab^2}{l}$.

Si les poids sont uniformément répartis sur une pièce simplement posée sur deux appuis, on a $P_3 = \frac{4}{3} R \frac{ab^2}{l}$ ($P_3$ étant alors la somme des poids).

Enfin si les poids sont uniformément répartis sur une pièce encastrée à ses deux extrémités, la formule est $P_3 = \frac{8}{3} R \frac{ab^2}{l}$ ($P_3$ *dito*).

Les formules de torsion pour les pièces rectangulaires et cylindriques sont $P_4 M = T\,\frac{b^2a^2}{3\sqrt{a^2+b^2}}$ ; $P_4 M = T\,\frac{a^3}{3\sqrt{2}}$ où $a$ et $b$ ont les mêmes significations que précédemment, et M est le bras de levier du poids $P_4$ en kilogrammes, opérant la torsion.

On voit d'après ces formules que, soit sous le rapport de la résistance, soit sous celui de la rigidité, celle des dimensions des bois rectilignes ou curvilignes, qui est dans le sens des pressions à supporter transversalement à la longueur, c'est-à-dire leur *hauteur*, doit être de beaucoup la plus forte; et que l'augmentation du double en largeur, par exemple, revient au même qu'à avoir deux fois plus de pièces qui auraient la largeur primitive. Mais outre qu'en employant des bois moins épais, on a plus de garanties contre les vices intérieurs des bois; plus de chances de n'em- Combinaisons diverses des bois assemblés.

ployer que des bois sains ; que les réparations et remplacements sont plus faciles ; le rapprochement des pièces répartit mieux leur charge sur leurs appuis, et permet de réduire les dimensions de toutes les pièces, qui à leur tour doivent les supporter. En définitive, le cube des bois mis en œuvre est moins considérable, et il y a une économie réelle qui n'est point atténuée par la main-d'œuvre, un peu plus dispendieuse dans les bois d'un moindre échantillon. Mais, ce qui est plus important encore, les charpentes sont moins lourdes ; pèsent moins sur elles-mêmes et sur leurs appuis ; et l'on n'est point exposé à les voir fléchir et rompre sous leur propre poids, comme cela est arrivé à une foule de vieilles charpentes.

On pourrait encore élégir davantage et en solides d'égale résistance, depuis leur milieu jusqu'à leurs extrémités, les pièces de bois qui supportent des efforts de compression dans le sens de leur longueur, ou des efforts de flexion transversalement à leur longueur ; si par-là l'on ne tranchait pas les fibres des bois, et si l'on n'altérait ainsi leur résistance.

Mais quand ces pièces doivent être formées de plusieurs autres par des assemblages, en contact ou à distance, on peut chercher à reproduire des formes d'égale résistance qui correspondent à toutes les éventualités de charge.

C'est ainsi que, pour les pièces encastrées à l'une de leurs extrémités, et chargées sur un seul ou plusieurs points de leur longueur, telles que des potences, des fermes d'estacades en bois ; le système *triangulaire*, généralement adopté, est en même temps invariable dans sa forme géométrique, et à peu près d'une égale résistance en tous ses points.

C'est ainsi encore que les fermes de charpente triangulaire d'un comble de toit, lorsque les parties rampantes ont été rendues solidaires avec les entraits formant poutres par des liaisons en bois ou en fer ; que ces fermes, disons-nous, présentent à la fois, comme tout à l'heure, un système invariable dans sa forme géométrique, et un solide d'égale résistance pour une charge uniformément répartie.

Figures 20 des planches.

Les systèmes de charpente à la Philibert Delorme et de M Emy, déjà cités, se rapprochent aussi des formes d'égale résistance.

D'ailleurs, une pièce de bois, qui est courbe naturellement ou artificiellement, et qui est appuyée solidement à ses extrémités, ne prend sous un

poids donné, que le tiers de la courbure qu'elle aurait, si elle était redressée et posée librement sur deux appuis.

M. Duleau a prouvé aussi : que si la charge était au milieu, le tiers milieu de l'arc fléchissait sous trois fois le poids qui aurait produit la flèche primitive naturelle ou artificielle; et que, si le poids était placé au quart de l'ouverture, la moitié de l'arc fléchissait sous deux fois le même poids que tout à l'heure. Dans les systèmes de charpentes cintrées de *Philibert Delorme*, de *Wiebeking*, de *M. le colonel Emy*, les reins sont toujours renforcés par des pièces de liaison, avec les parties horizontales et inclinées qui terminent les charpentes à l'extrados, et sont plus forts relativement que le milieu. On obtient de cette manière, à la fois, la résistance et la rigidité nécessaires. Fig. 17, 18, 19 des planches.

On peut citer comme modèles de systèmes de charpente bien conçus, ceux des fermes des anciens ponts sur le Rhin et autres fleuves d'Allemagne, décrits dans l'ouvrage de M. *Gauthey* sur la construction des ponts, et dans le recueil de *Krofft*.

Au reste, quand il s'agira de combiner un système de charpente, il faudra le considérer comme s'il ne formait qu'une seule pièce de bois; calculer ses formes et dimensions principales d'après les formules de résistance; puis on n'aura plus à s'occuper que de réaliser ces formes par des pièces de liaison en bois, fonte ou fer forgé, de manière à obtenir un tout solidaire. Le canevas de liaison doit présenter, autant que possible, des figures triangulaires; parce que dans ces figures, les angles sont invariables tant que les longueurs des côtés ne changent pas; propriété de laquelle résulte le maximum de solidité relatif à la disposition des pièces; et que ne possèdent pas les figures quadrangulaires et autres figures polygonales. Mais pour tirer de ce principe, fécond en applications, toutes ses conséquences, il faut prévenir, surtout dans les grandes charpentes, les pénétrations des surfaces des bois qui s'arc-boutent, en intercalant dans les surfaces de jonction des *lames* en *fonte de fer ou en fer forgé*. Figures 21 des planches.

Les bois ont une décroissance régulière de dimensions depuis le tronc jusqu'au sommet, qui réduit les dimensions au petit bout, dans certaines espèces de bois, à être à peine la moitié de celles du gros bout. Il importe d'y avoir égard dans la composition et le tracé des charpentes, de manière à éviter les déchets de bois, et surtout la section des fibres; ce qui arriverait si l'on était forcé de leur donner une section uniforme dans toute leur longueur.

Quant aux poussées que des arcs en bois peuvent exercer contre leurs appuis, on trouvera des méthodes de calculs dans l'ouvrage de M. Navier, et dans une note insérée par lui en 1831 aux *Annales des ponts et chaussées* sur la résistance des pièces curvilignes circulaires.

Voir pour plus de détails les ouvrages déjà cités de MM. Girard, Charles Dupin, Navier et Emy, le *Recueil des charpentes* de Krofft, le *Traité sur la construction des ponts* de Gauthey, et les épreuves sur un grand nombre de fermes en charpente de 8 mètres à 22 mètres de portée, publiées dans les *Annales maritimes et coloniales* de 1836 et 1837, et ayant pour objet de faire connaître la résistance de ces fermes, avec ou sans altération d'élasticité, sous des charges isolées ou uniformément réparties.

---

## RÉSUMÉ DE LA HUITIÈME LEÇON.

PROPRIÉTÉS ET RÉSISTANCES DE LA FONTE DE FER, DE L'ACIER, DU FER FORGÉ, DE LA TÔLE ET DU FIL DE FER, DU CUIVRE ROUGE, LAITON, BRONZE, FERBLANC, ZINC, ET DES CORDAGES EN CHANVRE.

La rareté et le prix de plus en plus élevé des bois, leur manque de durée, leur combustibilité, ont déterminé dans les constructions publiques et privées une substitution rapidement progressive, de la fonte de fer et du fer forgé au bois. Elle a surtout été hâtée: 1° par la facilité avec laquelle le coulage de la fonte de fer dans des fourneaux à *manche à la Wilkinson* produit des pièces d'un volume considérable, pleines ou creuses, d'une configuration appropriée à leur destination, et d'une résistance suffisante sans excédant de poids; 2° par les moyens que les nouveaux procédés de laminage des fers ont donnés d'étirer des fers pleins et creux, suivant diverses formes de sections, uniformes ou même variables dans la longueur des barres.

C'est au reste dans les traités et manuels de métallurgie, particulièrement de *Karsten*, *Pelouze*, *Laudrin*, les ouvrages de MM. les Ingénieurs des mines, *Elie de Beaumont*, *Dufrénoy*, *Manès* et *Combes*, et les *annales et journaux des mines* qu'il faut aller chercher les notions scientifiques et pratiques sur la fabrication de la fonte de fer, de l'acier et du fer forgé.

Quant à la force et à l'emploi de ces métaux dans les travaux, il existe : les traités de *Tredgold* et de *Wood*, l'*Essai théorique et expérimental* de Duleau; l'ouvrage de M. Navier déjà cité (*Résumé des leçons données à l'Ecole des ponts et chaussées sur la résistance des matériaux*); des mémoires de MM. Emile Martin, Séguin; divers articles inscrits aux *Annales maritimes*, *Annales des mines* et à *celles des ponts et chaussées* de 1834 à 1835 et 1836. On se bornera donc ici à quelques notions sommaires.

*De la fonte de fer.*

La fonte de fer a une pesanteur spécifique de 7,000 kilogrammes au mètre cube et est plus fusible que le fer forgé.

Cette matière et l'acier paraissent être une combinaison du fer avec le carbone, ou des carbures de fer pur ou oxidé.

On la distingue, à raison de sa cassure, en fonte *blanche*, *grise* et *noire*; et en raison de ses qualités caractéristiques, en fonte *aigre* et fonte *douce*. Enfin, elle s'appelle de première, deuxième, troisième fusion, suivant qu'elle a été prise directement après la conversion du minerai, ou a été refondue une seconde ou troisième fois.

La fonte blanche est généralement très-dure, très-cassante, et ne peut être entamée par les outils les plus résistants. C'est celle qu'on emploie de préférence pour la fabrication du fer forgé.

La fonte grise a une grande finesse, une pâte homogène et une couleur plombée. Elle a de la ténacité et de l'élasticité, se burine assez facilement, et est employée habituellement pour les bouches à feu, et généralement en deuxième fusion. Seule elle tend à devenir blanche quand elle est refondue de nouveau.

La fonte noirâtre est celle qui est la plus douce au burin et qui supporte le mieux la refonte; mais elle a quelquefois moins de ténacité que la fonte grise.

Le mélange de ces diverses fontes entr'elles et avec des débris d'objets façonnés hors de service, dans des proportions diverses, produit en deuxième et troisième fusion des matières qui varient pour leur ténacité, leur douceur, et la netteté de leurs arêtes. C'est dans le dosage, le choix et les qualités du combustible, le système de fours et de souffleries employé, le modelage des objets en ayant égard aux dépouilles et aux retraits de la fonte, dans la disposition des moules pour le coulage, le mode de coulage et de

refroidissement, que consistent les difficultés de l'art du fondeur. On sait qu'un refroidissement subit peut rendre blanches et cassantes les parties extérieures des pièces coulées.

La dépense des modèles exécutés étant assez considérable; l'emploi de la fonte de fer convient particulièrement pour les objets qui doivent être coulés en grand nombre.

La résistance de la fonte à la compression est beaucoup plus grande que sa résistance à l'allongement dans le sens des fibres, ou à des efforts transversaux à sa longueur.

On peut voir, dans les auteurs déjà cités, les résistances observées dans une foule d'expériences. L'altération d'élasticité commence à peu près aux $\frac{1}{4}$ de la charge qui déterminerait la rupture; et pour les fontes très-cassantes, cette limite est bien plus rapprochée de la rupture. On est convenu généralement que, pour des charges permanentes, on n'évaluerait la résistance par centimètre carré :

Qu'à 2,500ᵏ pour la compression, en la réduisant aux $\frac{2}{3}$, à $\frac{1}{6}$, $\frac{1}{8}$, selon que la longueur serait 4 fois, 8 fois, 36 fois la moindre dimension d'équarrissage ;

Qu'à 160ᵏ pour la traction longitudinale;

Qu'à 400 à 600ᵏ pour la flexion transversale aux fibres, suivant que la fonte serait dure ou douce;

Enfin, pour la résistance à la torsion par centimètre carré, à 340ᵏ, ou 680ᵏ, suivant que la fonte sera dure ou douce.

Ce sont ces chiffres qui doivent entrer dans les formules de calcul des résistances des pièces ou systèmes en fonte.

Les analogies physiques de la fonte de fer, plus grandes avec la pierre qu'avec le bois, tendent à lui faire l'application des formules déjà présentées pour la pierre. Au reste, ces formules, diverses pour les dénominations numériques, sont semblables pour les rapports entre les dimensions et les charges, et manifestent également l'influence marquée, soit sous le rapport de la résistance, soit sous le rapport de la flexion, de celle des deux dimensions d'équarrissage, qui est dans le sens de l'effort à exercer.

Il n'a point été fait d'expériences sur la résistance latérale de la fonte, sous des efforts parallèles ou perpendiculaires aux plans de rupture *c*, *a*, *d*, tendant à faire glisser les fibres les unes sur les autres, ou à les détacher.

On renvoie pour la torsion à la formule donnée pour le bois.

On se bornera à ajouter ici la formule de résistance à la flexion transversale pour les tuyaux cylindriques creux, qui est :

Pour une pièce posée sur deux appuis distants d'une longueur $l$ en centimètres, $P = R\pi \frac{r'^4 - r''^4}{4lr'}$, $r'$ et $r''$ étant en centimètres les rayons des cylindres intérieurs et extérieurs, P le poids au milieu en kilogrammes. Elle subirait d'ailleurs les mêmes modifications que les autres formules dans les cas d'encastrement et de charge uniformément répartie.

La formule précédente fait ressortir la grande économie qu'on trouve dans l'emploi des tuyaux en fonte, de préférence à des barres pleines.

Une des plus heureuses applications des tuyaux creux en fonte a été faite par M. *Polonceau*, Inspecteur divisionnaire des ponts et chaussées, au nouveau pont des Saints-Pères à Paris, pour les cintres principaux des arches. Ces tuyaux présentent une section elliptique très-allongée, dont le grand axe est dans un plan vertical.

Au port de Lorient on a coulé, en fonte de fer, des limons d'escaliers circulaires à double surface gauche, qui, sous le rapport du moulage, se placent parmi les pièces les plus difficiles.

On peut voir d'ailleurs, dans les ouvrages de *Tredgold* et de feu *Navier*, les formes d'égale résistance des pièces en fonte diversement chargées, les élégissements qu'il est possible de réaliser, et les défauts de fonte qu'on peut admettre, sans diminuer sensiblement la résistance et la rigidité.

Ce qu'on a dit plus haut pour les systèmes de charpente en bois, s'applique aux systèmes de canevas en fonte ; seulement il conviendra, pour les liaisons intérieures du canevas, d'employer le fer forgé qui présente une résistance à la traction longitudinale, plus que triple de celle de la fonte. Fig. 22, 23,... 27, des planches.

Les exemples présentés dans les figures de 21 à 28 de l'atlas des planches, suffiront pour compléter les notions nécessaires.

La charpente en fonte de fer et fer forgé du nouveau marché de la Madelaine à Paris (*fig.* 25), présente entre autres un modèle, de judicieux emploi de ces matières, de solidité et à la fois de légèreté.

Quelques faits semblent annoncer que les différences brusques de température peuvent déterminer la rupture instantanée des pièces en fonte, probablement par suite d'inégalité dans les retraits ou dilatations. Les chocs directs et non amortis par des matières compressibles, telles que le bois,

le plomb, etc., peuvent aussi déterminer ces accidents. Il faut tenir compte de ces effets dans la composition des systèmes de charpente en fonte.

La fonte de fer, quoique moins oxidable à l'air et dans l'eau douce que le fer forgé, l'est encore beaucoup : on n'a trouvé d'autres préservatifs efficaces contre cet effet, que la peinture au minium fréquemment renouvelée, et le goudron minéral ; mais ce dernier, à raison de *sa viscosité*, est très-long à sécher.

Dans l'eau de mer, après une longue immersion, la fonte éprouve des altérations graves; elle y prend la cassure et la douceur de la plombagine.

*De l'acier.*

L'acier, lorsqu'il n'est pas *écroui*, a une pesanteur spécifique de 7814[k]. C'est un carbure de fer, moins riche en carbone que les fontes. Il présente une grande dureté et une grande élasticité; il est caractéristique par sa propriété de devenir plus dur et cassant par un changement brusque de température, et de redevenir ductile par un nouveau chauffage et un refroidissement graduel.

L'acier naturel ou d'Allemagne provient du traitement des fontes grises.

L'acier de *cémentation* est du fer trempé au *paquet*. Il provient de la réaction par le feu, dans des enveloppes fermées à l'air, de barres de fer sur de la poussière de charbon très-divisée, ou sur des corps dont la combustion présente le charbon au fer dans un état de grande division. L'acier *poule* est le produit le plus grossier de ce genre de fabrication.

L'acier *fondu*, qui est l'acier le plus dur, provient ou directement de la fonte, ou de la fusion d'aciers ordinaires. On est parvenu à le rendre soudable à lui-même et avec le fer, propriété que les autres aciers possèdent à un haut degré.

Si l'on forge, pour les souder ensemble, plusieurs lames, les unes de fer, les autres d'acier, il en résulte une substance mixte nommée *étoffe*. Elle réunit au liant du fer la dureté et l'élasticité de l'acier.

C'est avec cette étoffe que se confectionnent les canons de fusils et beaucoup de ressorts.

L'acier n'est guère employé dans les grands travaux que pour la confection et les réparations des outils des diverses professions. On renvoie à l'ouvrage de M. Navier, déjà cité, pour ce qui concerne sa résistance.

*Du fer forgé, de la tôle et du fil de fer.*

Le fer forgé, la tôle et le fil de fer ont pour pesanteur spécifique environ 7700 kilogrammes; sont fusibles à 160° du pyromètre de Wedgwood, ou 1280° de Réaumur. Ils proviennent du traitement des fontes blanches dans des fourneaux dits d'*affinerie*, à l'aide de charbon de bois ou de houille. Le fer sort de ces fourneaux à l'état de *loupes*. Ces loupes sont transformées en barres de toutes dimensions, soit par le battage des martinets, auquel cas les fers s'appellent *martelés*; soit en passant entre des cylindres cannelés, ou unis s'il s'agit de produire de la tôle, auquel cas les fers s'appellent *laminés*.

Le poids des loupes primitives est au plus de 50 kilog., et détermine la longueur qu'on peut obtenir en barres de diverses sections. Cette longueur ne peut être, par exemple, que d'environ 2m,50 au plus pour des barres de fer carré de 5 centim.

Si donc on veut obtenir pour des longueurs de 2 à 3 mètres, des dimensions de section au delà de 0m,060 d'équarrissage, ou de diamètre, ou du fer plat sur une section de plus de 36 centim. carrés, il faut *corroyer* plusieurs barres de fer entre elles par une seconde opération, qui exige nécessairement l'emploi des *martinets*. Dans cette nouvelle préparation par le feu et le martelage, le fer dit *corroyé* acquiert plus de pureté, d'homogénéité et de résistance.

Souvent l'absence de fers d'échantillon convenable, force d'allonger, ou de grossir, ou même de dénaturer de forme les seuls fers qu'on ait à sa disposition. Ces opérations, faites dans des forges ordinaires, sont fort coûteuses en charbon et main-d'œuvre, et il faut les éviter autant que possible.

Le fil de fer s'obtient en faisant passer du fer rond de petit calibre par des filières dont les trous suivent une décroissance progressive. Le fer auquel on fait subir ce travail est nécessairement du fer très-ductile; aussi la résistance à la rupture et l'élasticité sont, à section égale, presque doubles dans le fil de fer de petit échantillon, que dans le fer forgé d'échantillon ordinaire. C'est ce fait qui a conduit à essayer la substitution des fils de fer *non commis* aux menues cordes de réverbères et autres; des mêmes fils de fer *non commis*, à certains cordages fixes du grément des navires; et des faisceaux de ces fils, aux chaînes polygonales ou barres de fer employées d'abord exclusivement pour les ponts et autres ouvrages suspendus.

On distingue généralement les fers forgés en fers *doux* et fers *durs*. Les premiers sont peu rigides à froid, mais peuvent supporter de grandes flexions sans rompre; les autres sont plus rigides, plus élastiques, mais la limite d'altération d'élasticité est plus près de leur rupture. (On trouvera des détails circonstanciés sur ces deux espèces principales de fers, dans un mémoire de M. Emile Martin, inséré aux *Annales des mines* de 1834, et reproduit dans celles des *ponts et chaussées* de la même année.)

Les fers doux ont, à froid, une cassure fibreuse un peu entremêlée de grains fins; dans les fers durs, la proportion des grains aux fibres est plus grande, et quelquefois même il n'y a pas de fibre apparente à la simple vue.

Quand le grain est à grosses *facettes* brillantes, ordinairement le fer est cassant à froid. Quand la cassure à froid est noirâtre avec quelques traces jaunes, le fer est *rouvrain* ou cassant et non soudable à chaud. Ce vice provient ordinairement du soufre, du manganèse ou de l'arsenic combinés avec le fer.

Les défauts du fer en barres, tôle ou fil, qui tiennent à la fabrication, sont :

La *doublure* : c'est le manque de prise ou une lacune dans la soudure d'un fer mal corroyé ou mal laminé.

Les *cendrures* : ce sont des matières étrangères interposées dans le fer. Ce défaut ne nuit pas à la solidité, mais il dépare l'ouvrage.

Les *criques* sont des fentes transversales provenant de l'action des martinets.

Les *pailles* sont de petites doublures qui occupent peu d'espace et sont à la superficie du fer.

Le *travers* est un défaut qui se trouve dans le sens de la longueur du fer : c'est une solution de continuité fort dangereuse dans la contexture du fer.

La résistance du fer forgé, de la tôle de fer et du fil de fer, varie entre des limites fort étendues pour le fer. Dans les objets fabriqués en fer; outre la détérioration que le métal a pu éprouver par le contact d'un charbon de mauvaise qualité, par des chaudes mal appropriées à la nature du métal; l'expérience a prouvé que ce dernier pouvait avoir des résistances très-différentes sous les rapports d'altération d'élasticité, et de rupture, suivant qu'il avait été façonné longitudinalement ou transver-

salement à l'enclume, refroidi lentement ou subitement, recuit ou non recuit.

On sait d'ailleurs que l'*écrouissage* ou martelage superficiel du fer froid ou légèrement chauffé, le rendent plus résistant, plus dur à la surface, lui donnent quelques-unes des qualités de l'acier, mais le rendent aussi moins flexible. C'est probablement à cette cause qu'on doit aussi la résistance généralement beaucoup plus grande dans les fibres extérieures que dans les fibres intérieures du fer en barres. Elle se manifeste journellement par la facilité qu'on trouve à rompre une barre de fer, quand on a fait une légère entaille avec un ciseau à froid sur un des côtés et en travers de la longueur.

On peut voir, dans les ouvrages cités ci-dessus, les chiffres des épreuves faites sur le fer; mais l'altération d'élasticité commence à peu près au tiers de la charge de rupture; cette altération augmente avec la permanence des charges et avec le temps; d'autre part le fer, par son oxidation, perd avec le temps une partie de plus en plus grande de sa force; il est prouvé qu'il résiste beaucoup plus par les fibres qui avoisinent le périmètre de la section que par les fibres intérieures; par tous ces motifs on s'accorde généralement à adopter pour résistance moyenne par *centimètre carré* :

| | A la traction. | | A la compression. | A la flexion. | A la torsion. |
|---|---|---|---|---|---|
| Du fer en barres de gros échantillon, au delà d'une section de 25 centimètres carrés. | 500 k. | Pour une longueur au-dessous de 12 fois la moindre dimension de section | 600 k. | 400 | 500 k. |
| | | Pour une longueur de 12 à 24 fois la moindre dimension de section | 375 | | |
| | | Pour une longueur de 24 à 36 fois la moindre dimension de section. | 200 | | |
| Du fer en barres d'échantillon inférieur au précédent | 800 | Dans les trois cas respectifs ci-dessus. | 960<br>600<br>400 | 640 | 800 |
| De la tôle de fer tirée dans le sens du laminage | 700 | | | 570 | • |
| De la tôle de fer tirée dans le sens perpendiculaire au laminage | 630 | | | 510 | • |
| Du fil de fer gros, au-dessus du n° 18, ou de 3 millimètres de diamètre au plus. | 1200 | | | 1000 | 1200 |
| Du fil de fer mince, au-dessous du numéro précédent. | 1600 | | | 1340 | 1600 |

Dans les expériences de M. Seguin et de M. le colonel Dufour de Genève, la force du fil de fer recuit a été trouvée moitié moindre que celle du fil de fer non recuit.

On ne connait point d'épreuves sur l'adhérence latérale du fer, de la

tôle et du fil de fer, suivant que l'effort s'exerce parallèlement ou perpendiculairement au plan de rupture.

Les formules de résistance pour le fer forgé sont d'ailleurs les mêmes que pour le bois, sauf les valeurs numériques données ci-dessus pour le coefficient qui représente la résistance par centimètre carré.

Figures 22, 23, 24, 25, 26, 27 des planches. Tout ce qu'on a dit sur les systèmes de charpente en bois s'applique aussi aux systèmes de charpente en fer forgé. Mais il y aura presque toujours avantage à former des canevas où la fonte de fer et le fer forgé se trouveront à la fois; la première pour les pièces qui devront résister à la *compression*, et le fer forgé pour celles qui devront résister à l'*allongement*.

Le fer forgé, la tôle et le fil de fer se rouillent avec une grande rapidité, surtout, dans l'atmosphère humide et saline des côtes maritimes, et par leur immersion dans l'eau. La peinture au minium et le goudron minéral sont, comme pour la fonte de fer, les préservatifs les plus efficaces. S'il ne s'agissait que de conserver les barres en fer brut jusqu'à leur mise en œuvre; ou les objets œuvrés depuis leur confection jusqu'à leur emploi, il parait qu'on y réussirait par le procédé de MM. Thenard et Payen, qui n'est que l'immersion *permanente* dans de l'eau alkalinée par de la chaux, de la potasse ou de la soude (voir un article de M. Payen inséré aux *Annales des ponts et chaussées* de 1833).

La prompte oxidation des surfaces des fers laminés creux et des fils de fer, est une des principales objections faites contre leur substitution aux barres pleines en fer forgé dans une foule d'emplois, et notamment pour la suspension des ponts et autres constructions. Le fil de laiton résisterait mieux à cette détérioration; mais il est bien plus cher, moins fort et plus cassant.

Il a été pris récemment, par MM. Sorel et compagnie, un brevet pour la préservation galvanique du fer, soit en l'étamant par l'immersion dans un bain de zinc en fusion, soit en le recouvrant d'une couche de peinture dite *galvanique*.

*Cuivre rouge, laiton, bronze, plomb, zinc.*

La prompte oxidation du fer forgé et de la fonte de fer ont déterminé, surtout pour les ouvrages à la mer et les bâtiments flottants, à substituer le cuivre rouge forgé au fer forgé; le cuivre jaune ou laiton à la fonte de fer; les feuilles laminées de cuivre rouge, jaune ou de bronze, à la tôle

de fer ; enfin, le fil de laiton au fil de fer. Leur pesanteur spécifique varie de 8800 kilog. à 7800 kilog. pour les cuivres purs et alliés.

Mais la moindre résistance de ces substances, leur pesanteur spécifique plus grande, leur prix, au kilogramme, plus que triple de celui du fer œuvré de la même manière, ont restreint leur emploi.

Il est essentiel pour éviter la prompte destruction par l'action galvanique d'interposer des corps peu conducteurs, tels que le bois mince, le carton, entre les objets en cuivre, laiton ou bronze, et ceux adjacents en fer ou autres métaux. Les *Annales maritimes et coloniales* de 1816 contiennent sur cet objet un mémoire fort intéressant de feu M. Rolland, Inspecteur général du génie maritime.

La résistance à la rupture par extension a été trouvée par centimètre quarré :

| | | | |
|---|---|---|---|
| Pour le cuivre rouge fondu. . . | 1300 kil. | Pour le même laminé. . | 2100 kil. |
| Pour le cuivre jaune fondu. . . | 1200 | — | 1900 |
| Pour le bronze fondu. . . . . . | 2600 | | |
| Pour le fil de laiton. . . . . . . | » | — | 4000 |

Mais pour des charges permanentes il faudra se borner au quart des chiffres ci-dessus.

Les feuilles à doublage de la marine ont pour dimensions et poids :

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Les grandes . . . . . . . . . . . . . | $1^m$,60 sur | $0^m$,50 et | 1 mill. d'épaisseur, | $6^k$,39 |
| Les petites. . . . . . . . . . . . . | 1 ,45 | 0 ,34 | 1 — | 3 ,83 |
| On a employé pour la couverture de la cale de *Lorient*, des feuilles de. . | $2^m$,20 | $1^m$,10 | $\frac{3}{4}$ de millimètre, | 12 ,10 |

(Voir les essais comparatifs sur les doublages en cuivre et en bronze dans les *Annales maritimes et coloniales* de 1834 à 1837.)

Le zinc laminé et coulé pour la clouterie est destiné à un emploi toujours croissant, et qui ne sera restreint que par sa facile fusion et sa volatilisation. Sa pesanteur spécifique varie de 6800 à 7000 kil. le mètre cube. Sa résistance à la rupture par traction, est, par centimètre quarré, pour le zinc fondu de 6 kil.; pour le zinc laminé, de 8 kil.; mais dans la pratique il ne faudra compter que sur le quart de ces chiffres. Du zinc.

Il est constaté aujourd'hui que son oxidation superficielle est le meilleur vernis pour en arrêter les progrès; attendu que l'oxide de zinc ne s'enlève point par écailles comme la rouille du fer. Déjà le zinc est substitué, avec une économie notable, à la tôle de fer et au plomb laminé pour les toi-

tures, et quelquefois même à l'ardoise et aux tuiles. Il doit être substitué partout au fer-blanc pour les gouttières et tuyaux de descente.

Les expériences récentes faites dans les ports militaires, établissent que le zinc laminé est un excellent préservatif contre l'action des vers marins sur les bois; qu'il peut remplacer le mailletage, et même les feuilles de doublage en cuivre pour les embarcations et bâtiments de servitude des ports.

On renvoie au mémoire de M. Belmas, officier du génie, et à une note de M. l'Ingénieur Boisvillette, insérés aux *Annales des ponts et chaussées* de 1833 et 1835, pour plus de détails sur le zinc laminé.

Du plomb. Le plomb en saumons, laminé ou en tuyaux, dont la pesanteur spécifique est d'environ 11352 kilog., est d'un usage assez fréquent dans les constructions.

Il sert à sceller le fer dans la pierre, et par sa compressibilité atténue les effets de l'augmentation de volume que prend le fer par l'oxidation; on l'emploie à couler des tuyaux de conduite d'eau de 8 cent. de diamètre et au-dessus, et qui peuvent avoir 2 mètres jusqu'à $2^{m},50$ de longueur.

Les tuyaux creux *étirés* en plomb, au-dessous de 8 cent. de diamètre, remplacent aujourd'hui avec avantage les tuyaux autrefois coulés, et même les tuyaux avec soudure longitudinale, fabriqués avec des feuilles de plomb laminé, et qu'on avait par transition substitués aux tuyaux coulés. Enfin, les feuilles de plomb laminé, sur une épaisseur de $\frac{1}{2}$ ligne ($1^{mill},1$), servent à garnir les faîtes et les diverses pénétrations des surfaces de toitures.

La résistance à la rupture par traction a été trouvé par centimètre quarré :

| | |
|---|---|
| Pour le plomb fondu, de. . . . | 80 kil. |
| Pour le plomb laminé, de . . . | 135 |

Mais ce métal étant dénué d'élasticité, ne devra être, pour des charges permanentes, soumis qu'au *dixième* des efforts ci-dessus.

Observation commune à tous les métaux. Une remarque importante et commune à tous les métaux, c'est qu'ils éprouvent à divers degrés des allongements et des raccourcissements considérables par les changements de température; et que si l'on n'en tenait pas compte dans les détails d'exécution, il pourrait survenir soit des mouvements dans les points fixes d'attache, soit des déformations, des gerçures, des ruptures dans les objets métalliques eux-mêmes.

On sait qu'à Rome pour la restauration de la coupole du Vatican, et à Paris pour le redressement des murs du Conservatoire des arts et métiers,

on a tiré parti de la propriété qu'ont les métaux de se dilater par la chaleur et de se raccourcir par le froid.

On trouve, dans l'*Annuaire du bureau des longitudes*, les quantités d'allongement des divers métaux en fractions de leurs dimensions linéaires, par chaque degré de température.

*Cordages en chanvre.*

Les cordages ne sont guère employés dans les constructions que comme moyens auxiliaires d'exécution.

On n'en fera mention ici que sommairement. On distinguait autrefois les cordages, en cordages de chanvre de 1er *brin*, et cordages de chanvre de 2e *brin*. Mais depuis quelques années, la marine militaire, qui est le principal consommateur de cette matière, a renoncé à la distinction des brins; et l'on ne fait plus qu'une seule espèce de cordage, dite d'*avalage*, dans laquelle les brins de diverses qualités sont confondus. L'introduction presque simultanée des nouveaux procédés de commettage inventés par M. Hubert, directeur des constructions navales au port de Rochefort, a permis, à force égale, de réduire presque d'un cinquième la grosseur des cordages.

On distingue, dans les usages industriels, le cordage blanc et le cordage goudronné. Le premier est plus fort que le second de près d'un tiers, et même plus durable quand il est à l'abri dans un lieu sec et bien aéré; mais il se détériore presque immédiatement à l'eau et dans l'air humide et salin des ports de mer; et c'est par ce motif qu'on n'emploie presque généralement dans la marine que les cordages faits avec des fils goudronnés.

On a proposé de substituer le tannage au goudronnage, parce que le goudron, à la longue, se délaie dans l'eau.

Le *commettage* qui a pour objet de déterminer une liaison intime dans les fils élémentaires, dits *fils de carret*, et de rendre possible leur passage dans les gorges des poulies, ne procure également cet avantage qu'aux dépens de la force. Aussi on emploie de préférence, toutes les fois que cela est possible, des faisceaux de fils carrets tendus parallèlement, bridés à petits intervalles par le travers, et qu'on nomme *torons*, *herses*.

Les cordages se mesurent encore à la *brasse* (la brasse a 5 pieds de longueur ou $1^m,630$), et par pouce ($0^m,027$) de circonférence.

La résistance d'un cordage à la rupture par traction, est donnée par la

formule $P=R\frac{3}{4}\pi d^2$, où $d$ est le diamètre en centimètres; R la résistance par centimètre carré. Pour les cordages blancs neufs elle est, par centimètre carré de section, de 400 kilog.; mais, pour ne pas altérer l'élasticité, on ne compte habituellement que sur 130 kilog. par centimètre carré pour des charges permanentes, et sur 200 kilog. pour des charges temporaires.

L'allongement du cordage est très-considérable avant et après l'altération d'élasticité. Cette propriété, qui dans les manœuvres a quelquefois des inconvénients, a l'avantage aussi de faire prévoir les chances de rupture. Cet allongement a varié de 0,07 à 0,27 dans les expériences de M. l'officier du génie Bodson de Noirfontaine, insérées aux *Annales des ponts et chaussées* de 1832.

Les cordages secs se raccourcissent beaucoup quand ils sont mouillés; et l'on a profité de cette propriété dans de grandes opérations pour accroître les efforts moteurs, et prévenir des accidents graves.

Les cordages rompus se renouent par des *épissures*, qui consistent, 1° soit à *déshélicer* quelques-uns des *torons* de chacun des segments du cordage rompu, pour les remplacer par un même nombre de *torons* de l'autre segment, et à engager les extrémités de ceux-ci entre les extrémités de ceux-là; 2° soit à décorder en partie les *torons* des deux bouts du cordage à renouer, et à engager, trois ou quatre fois consécutives, les divers *torons* de chacun d'eux, entre les parties des *torons* de l'autre segment qui n'ont point été séparés. On a l'attention, dans l'un et l'autre procédé de déformer le moins possible le cordage.

La roideur et le frottement des cordages sont des causes de déperdition considérable de force motrice, qui atténuent de beaucoup les effets statiques et dynamiques déduits de la théorie. Toutes les améliorations dans la préparation du chanvre et des cordages, qui pour les mêmes grosseurs et sous le même poids augmenteront la résistance, seront donc doublement profitables dans les travaux.

( Voir, pour plus de détails, les ouvrages du Duhamel du Monceau, l'Encyclopédie de marine, les expériences de Coulomb, du capitaine Morin, les divers ouvrages sur les machines; enfin les articles insérés aux *Annales maritimes et coloniales* de 1820, sur les nouveaux procédés de commettage de M. Hubert. )

# RÉSUMÉ DE LA NEUVIÈME LEÇON.

GOURNABLES. — OBJETS DE CLOUTERIE. — VIS A BOIS. — MATÉRIAUX DE PAILLASSONNAGES, FASCINAGES, PLATES-FORMES, ETC., ETC.

Les liaisons de divers plans de bois superposés s'opèrent à l'aide, soit de chevilles en bois nommées *gournables*, soit de clous en métal de diverses formes, ou de *vis à bois*, qui sont des sortes de clous *taraudés*.

Dans les bois à contexture fibreuse, les trous pour les gournables, clous et vis, doivent, autant que possible, être percés transversalement au sens des fibres. L'expérience a fait connaître, en effet, que l'effort à exercer pour l'arrachage des clous était dans le rapport de 4 à 3 pour les bois durs, et de 2 à 1 pour les bois tendres, suivant qu'ils avaient été enfoncés perpendiculairement ou parallèlement au sens des fibres. Des gournables.

Les gournables doivent être sans nœuds, de droit fil; ou au moins les fibres du bois n'ont pas dû être tranchées dans la confection. Cette condition et celle du démaigrissement des gournables dans le sens de la longueur ont été complétement satisfaites dans une machine-outil très-ingénieuse pour arrondir les gournables, imaginée par M. Hubert, directeur des constructions navales à Rochefort, et employée aujourd'hui dans tous les arsenaux de la marine. Figures 28 des planches.

Les gournables sont ordinairement en chêne, parce que cette essence de bois d'une grande densité, résiste le mieux au choc dans l'enfoncement, et est moins susceptible que toute autre de changements de volume par les alternatives de sécheresse et d'humidité. Les dimensions ordinaires des gournables dans la marine militaire sont :

| | 1re ESPÈCE. | 2e ESPÈCE. | 3e ESPÈCE. | 4e ESPÈCE. |
|---|---|---|---|---|
| Longueur | 1m,10 | 0m,80 | 0m,60 | 0m,50 |
| Diamètre | 0 ,052 | 0 ,044 | 0 ,040 | 0 ,035 |

Les clous en métal sont ou fondus, ou forgés, et en fer, cuivre rouge, cuivre jaune, et zinc.

Clous fondus. Les clous fondus en cuivre jaune ou en zinc ne dépassent pas ordinairement 4 cent. de longueur de tige, et ne sont employés que pour fixer des feuilles métalliques d'enveloppe, de garniture ou de couverture.

On en fait un grand usage dans la marine pour le doublage de la partie immergée ou *œuvres vives* des navires.

Clous forgés. Les clous forgés se distinguent en grande clouterie, qui s'étend de 30 c. de longueur de tige à 70 c. et au delà; moyenne clouterie de 11 à 30 c., et menue clouterie au-dessous de 11 centimètres.

On ne confectionne en cuivre rouge, 1° que les clous et vis qui, particulièrement dans les constructions à la mer, doivent être en contact avec des feuilles métalliques de cuivre ou bronze; car le jeu du galvanisme entre des clous en fer et des feuilles de cuivre, sous l'influence de l'eau de mer, détruirait les clous de fer avec une extrême rapidité; 2° que les clous et vis qui sont enfoncés dans le *hêtre*; parce que les acides que contient sa sève oxident aussi le fer très-promptement; 3° les clous et vis placés près des dépôts de poudres ou d'artifices fulminants, et cela pour éviter les effets calorifiques des frottements ou du choc sur le fer.

La marine militaire étant le plus grand consommateur en objets de clouterie; les formes, dimensions et poids des clous qui y sont employés, y ont été étudiés avec soin, et réglés de manière à être représentés graphiquement dans chaque catégorie par des courbes continues, où les longueurs des clous sont les *abscisses*, et où les poids individuels, et nombres de clous au kilogramme, sont les *ordonnées*.

L'on croit utile d'en présenter ci-après le tableau résumé.

| Dénomination des clous en fer. | Longueurs, y compris la tête. | Poids d'un clou. | Nombre de clous au kilogramme. |
|---|---|---|---|
| | centimètres. | kilogrammes. | |
| Grande clouterie à tête de diamant, collet carré, tige plate sur un sens | 65 | 3,00 | • |
| | 62 | 2,62 | • |
| | 59 | 2,29 | • |
| | 56 | 2,01 | • |
| | 53 | 1,78 | • |
| | 50 | 1,60 | • |
| | 47 | 1,33 | • |
| | 44 | 1,155 | • |
| | 41 | 0,960 | • |
| | 38 | 0,830 | • |
| | 35 | 0,690 | • |
| | 32 | 0,555 | • |
| Moyenne clouterie, *id.* | 30 | 0,49 | • |
| | 28 | 0.41 | • |
| | 26 | 0,35 | 3 |
| | 24 | 0,29 | 3,5 |
| | 22 | 0,24 | 4 |
| | 20 | 0,19 | 5,50 |
| | 18 | 0,15 | 6,50 |
| | 16 | 0,11 | 9 |
| | 15 | 0,10 | 10 |
| | 14 | 0,09 | 11 |
| | 13 | 0,075 | 13,30 |
| | 12 | 0.065 | 16 |
| | 11 | 0,052 | 20 |
| *Menue clouterie.* | | | |
| Clous à tête de diamant | 10 | | 49 |
| | 9 | | 61 |
| | 8 | | 75 |
| | 7 | | 97 |
| | 6 | | 130 |
| | 5 | | 183 |
| | 4,5 | | 224 |
| | 4 | | 281 |
| | 3,5 | | 262 |
| | 3 | | 485 |
| | 2,5 | | 720 |
| Clous à tête carrée et plate, ou à tête ronde et rabattue. — Clous à tige forte | 10 | | 56 |
| | 9 | | 67 |
| | 8 | | 83 |
| | 7 | | 105 |
| | 6 | | 137 |
| | 5 | | 190 |
| Clous à tête carrée et plate, ou à tête ronde et rabattue. — Clous à tige moyenne | 10 | | 64 |
| | 9 | | 78 |
| | 8 | | 97 |
| | 7 | | 135 |
| | 6 | | 167 |
| | 5 | | 235 |
| | 4,5 | | 287 |
| | 4 | | 358 |
| | 3,5 | | 460 |
| | 3 | | 615 |
| | 2,5 | | 873 |
| | 2 | | 1072 |
| | 1,5 | | 1430 |
| | 1 | | 2200 |

| DÉNOMINATION DES CLOUS EN FER. | LONGUEUR, y compris la tête. | POIDS d'un clou. | NOMBRE DE CLOUS au kilogramme. |
|---|---|---|---|
| | centimètres. | | |
| Clous à ailes de mouches, à tige menue et pyramidale | 8 | | 185 |
| | 7 | | 158 |
| | 6 | | 209 |
| | 5 | | 291 |
| | 4,5 | | 352 |
| | 4 | | 435 |
| | 3,5 | | 553 |
| | 3 | | 730 |
| | 2,5 | | 1043 |
| | 2 | | 1515 |
| | 1,5 | | 2544 |
| Clous à plomb | 5 | | 154 |
| | 4,5 | | 176 |
| | 4 | | 205 |
| | 3,5 | | 244 |
| | 3 | | 296 |
| | 2,5 | | 374 |
| | 2 | | 500 |
| Clous à belettes | 4 | | 410 |
| Clous à lattes | 3 | | 545 |
| Clous à ardoises | 2,5 | | 900 |
| Clous à treillis | 1,5 | | 2650 |

Pour les clous de cuivre des mêmes dimensions, il faudrait évaluer le nombre de clous au kilogramme en raison inverse des pesanteurs spécifiques du fer et du cuivre.

Les clous en fer doivent être d'un fer très-doux et malléable ; on les assujettit dans la marine à être enfoncés du tiers ou de la moitié de leur longueur dans un billot de chêne, à être ensuite ployés à angle droit et redressés sans être rompus ; et, après ces opérations, ils doivent encore supporter celles de l'arrachage et du redressement au feu.

M. *Bévan*, en Angleterre, a cherché par des expériences les efforts nécessaires pour enfoncer ou arracher des clous transversalement aux fibres : du bois il a trouvé que des clous de 6$^c$,25 de longueur de 160 au kilog., enfoncés dans du sapin de Norwége, exigeaient :

| | centim. | | |
|---|---|---|---|
| Pour un enfoncement de | 0,625 | 11 kil. | de pression. |
| — | 1,250 | 35 | — |
| — | 2,500 | 108 | — |
| — | 3,750 | 184 | — |
| — | 5,000 | 280 | — |

Les efforts pour l'arrachage n'étaient généralement que les $\frac{1}{6}$ des efforts d'enfoncement qui correspondaient à des fiches égales du clou.

Dans le même bois de sapin de Norwége, M. Bévan a obtenu les résultats suivants, toujours dans l'hypothèse de clous enfoncés transversalement aux fibres :

| LONGUEUR des clous. | NOMBRE DE CLOUS au kilogramme. | QUANTITÉ d'enfoncement | FORCE NÉCESSAIRE pour l'arrachage. |
|---|---|---|---|
| centimètres. | | centimètres. | kilogrammes. |
| 1,10 | 9,900 | 1,00 | 11,00 |
| 1,32 | 6,980 | 1,10 | 19,00 |
| 3,10 | 1,200 | 1,25 | 29,60 |
| 3,50 (*) | 820 | 1,25 | 36,00 |
| 5,00 | 300 | 3,75 | 163,00 |
| 6,25 | 160 | 2,50 | 95,00 |
| 6,25 | 160 | 3,75 | 166,00 |
| 6,25 | 160 | 5,00 | 270,00 |

Dans du chêne sec, la force d'arrachage pour l'espèce de clous marquée (*) a été de 233 kilog. pour un enfoncement de $2^c,50$, et de près de 470 kilog. pour un enfoncement de 5 centimètres.

Pour le bois de sycomore, et dans les mêmes circonstances, les efforts d'arrachage n'ont été que de 143 kilog. et de 286 kilog.

La force d'adhésion des vis à bois de la même longueur que les clous a été trouvée trois fois plus grande que celle de ces derniers.

*Des paillassonnages, clayonnages, fascinages, tunages, claies, plates-formes, saucissons, paniers de diverses formes, et des matériaux qui les composent.*

Les travaux, de rétrécissement de débouché, de barrages partiels, de défense des rives sur les grands fleuves, tels que le Rhin, le Danube; les travaux de protection des côtes maritimes naturelles ou artificielles; enfin les radiers, avant et arrière-radier de ponts en maçonnerie, déversoirs et écluses de navigation, consistent souvent en paillassonnages, clayonnages, fascinages, tunages, etc., etc.

Les matériaux principaux qui entrent dans ces genres d'ouvrages sont :

Les longs roseaux;

Les pailles de seigle ou froment;

Des piquets d'un faible diamètre;

Les jeunes tiges, dites *brins*, ou les branches longues, droites, flexibles d'arbres aquatiques, et particulièrement du saule, de l'aune, du peuplier, du tremble, et de bois blanc peu résineux;

Le gravier, à défaut de cailloutis analogue à celui des routes;

Un gazon herbu et argileux qui tapisse les lagunes découvrant aux hautes mers de mortes eaux : on le nommé *shore* en Hollande, Belgique, Flandre; et *briq* sur les côtes et dans les îles de la Vendée et de la Saintonge.

Les propriétés spéciales aux genres d'ouvrages mentionnés ci-dessus sont :

1° De s'enraciner facilement dans les parois existantes;

2° De se prêter par la flexibilité de leurs éléments, à toutes les ondulations de leur assiette de fondation, en répartissant ainsi convenablement les charges supérieures;

3° De pouvoir, par les variations facultatives de leur pesanteur spécifique, rester émergés pendant les premières périodes d'exécution, et être facilement immergés dans les dernières, à l'aide des matériaux mêmes de l'ouvrage;

4° D'ouvrir par leurs interstices une multitude de petits écoulements à l'eau, et d'arrêter en même temps, comme une sorte de filtre, les troubles en suspension, en les faisant servir ainsi à la consolidation même des ouvrages;

5° D'être généralement beaucoup plus économiques, à cube extérieur égal, que toute autre espèce de matériaux.

Des paillassonnages.

Le *paillassonnage* se compose, d'après une notice fort intéressante insérée par feu M. l'Ingénieur Brisson dans la deuxième *Collection lithographique de l'Ecole des ponts et chaussées*;

Figures 29 des planches.

1° D'une couche de 5 cent. d'épaisseur de roseaux, de *wareck* (goémon) ou paille, dont les brins sont placés dans le sens de la ligne de plus grande pente de la surface à revêtir;

2° De liens de paille formant des lignes transversales espacées de $0^m,15$ à $0^m,20$, et placés bout à bout dans chaque ligne. — Ces liens, de la grosseur du bras, sont enfoncés dans le sol à travers la couche de paille à des distances de $0^m,25$ à $0^m,30$, et pénètrent dans le sol de $0^m,15$ à $0^m,20$. La paille des liens doit être tordue soigneusement à chaque enfoncement.

Il entre par $12^{m.q.}$ de paillassonnage, 1° soit 15 bottes de paille de seigle ou de froment, dont 10 pour les premières couches et 5 pour les liens,

les bottes ayant chacune o^m,90 à l'endroit du lien; 2° ou 40 bottes de roseaux, chaque botte ayant moyennement 2^m,50 de longueur et o^m,25 de tour au moins sur les trois quarts de la longueur.

Les paillassonnages sont d'un entretien facile, mais qui doit être continu : ils durent environ un an s'ils ne sont exposés qu'à l'action des vagues de la mer, mais résistent moins longtemps aux débâcles et crues des fleuves.

Un *clayonnage* est en général un tissu formé de piquets équidistants, autour desquels on tresse transversalement des brins de bois flexible, dits *clayons*, en ayant soin de croiser les joints de chaque cours avec ceux des cours supérieur et inférieur, et de bien serrer les cours l'un sur l'autre. Des clayonnages.

La tête des piquets porte souvent un crochet naturel ou une cheville en bois pour retenir les *clayons tressés*. Les clayons doivent être des vergettes de choix, en bois blanc très-flexible, de 2^m,50 à 5 mèt. de longueur; leur grosseur, au maximum, est de o^m,18 de tour. On les lie ordinairement par bottes de 25. Chaque botte de clayons pèse moyennement 17^k,20, et déplace dans une immersion complète o^m.c.,02 d'eau. Figures 30 des planches.

L'espacement des piquets varie ordinairement de o^m,30 à o^m,40 sur la même rangée.

Les piquets d'un clayonnage enfoncé, dans le sol naturel ou *recouvert*, ont de 1^m,20 à 1^m,50 de longueur, et o^m,12 à o^m,18 de tour au milieu de leur longueur : ils sont appointés avant l'emploi, et leur tête doit être bien coupée d'équerre. Les piquets sont par bottes de 10; chaque botte pèse de 11 à 12 kilog., et déplace o^m.c.,0121 d'eau.

Un *fascinage* est une couche simple ou composée, d'une étendue variable, croisée par des lignes parallèles de clayonnages équidistantes depuis o^m,50 jusqu'à 1 mètre d'intervalle. Des fascinages.

Quand il n'y a qu'un seul système de ce genre, il se nomme *fascinage à plat*. Figures 31 des planches.

On compte :

| En Hollande. | Sur le Rhin. | |
|---|---|---|
| 9 piquets, | » | par mètre carré. |
| 28 clayons, | » | |
| 7 fascines, | » | |
| 130 piquets, | 200 piquets, | par cent de fascines. |
| 330 clayons, | 500 clayons, | |

Figures 32 des planches.

Quand plusieurs de ces systèmes croisés sont superposés verticalement, ou en talus ou par gradins, l'ouvrage se nomme *fascinage de soutènement*.

Des tunages. — Figures 33 des planches.

Enfin, il se nomme *tunage* quand les intervalles des clayonnages de chaque système sont remplis de terre, de sable, de graviers ou d'enrochements. La pesanteur spécifique moyenne de ces tunages a été dans les travaux du Rhin de 2,15, celle de l'eau étant 1.

M. l'Ingénieur Desfontaines établit ainsi la composition d'un mètre cube de tunages ordinaires :

3,50 fascines du Rhin,
7 piquets,
17,50 clayons,
$0^{m.c.}$,35 de gravier.

Des fascines.

Les *fascines* élémentaires d'un fascinage sont des faisceaux ronds de branches et brins de bois de 6 à 8 ans d'âge, dont tous les gros bouts se trouvent à une extrémité et toutes les pointes à l'autre. Les deux tiers des bois qui entrent dans une fascine doivent être d'un seul brin et ne pas dépasser au plus fort $0^m$,12 de diamètre. Il est bon de les couper peu de temps après la chute des feuilles, à moins toutefois qu'ils ne doivent végéter après leur mise en place.

Le faisceau est lié par des harts en osier, espacées depuis $0^m$,40 jusqu'à $0^m$,70.

Les petites fascines, particulièrement en bois de saule, ont de $1^m$,50 à 2 mètres de longueur, de $0^m$,50 à 1 mètre de tour au gros bout, et pèsent environ 15 kilogrammes.

Les fascines employées en Hollande et Flandre ont de $2^m$,50 à 3 mètres de longueur, et de $0^m$,40 à $0^m$,50 de tour au milieu

Les fascines du Rhin ont de 4 à 5 mètres de longueur, 1 mètre à $1^m$,65 de tour au gros bout, $0^m$,55 à $0^m$,50 au petit bout; pèsent moyennement $21^k$,4, et déplacent, complétement immergées, $0^{m.c.}$,024 d'eau.

On confectionne et lie les fascines à l'aide de petits chevalets ou de piquets fichés en terre et croisés hors de terre.

Des saucissons ordinaires

On place souvent les fascines bout à bout, de manière que le petit bout de l'une se réunisse avec le gros bout de l'autre par des ligatures très-fortes. On appelle *saucissons* ces longs cylindres.

Le génie militaire borne les saucissons à 6 mèt. de longueur, $0^m$,90 de

tour moyen; ils pèsent alors 130 kilogrammes. Les ligatures sont à $0^{m},30$ ou $0^{m},50$ l'une de l'autre.

Les saucissons en Hollande et Flandre ont jusqu'à 7 et 8 mètres de longueur, et $0^{m},40$ à $0^{m},50$ de tour moyen; les liens d'osier y sont placés de $0^{m},15$ en $0^{m},15$.

Les saucissons sur le Rhin ont de $0^{m},75$ à $1^{m},00$ de tour.

Les *claies* sont des plates-formes de petites dimensions, environ de $16^{m.q.}$ à $20^{m.q.}$, qu'on prépare hors de l'eau dans les travaux du Rhin, qu'on conduit sur place, et qui sont échouées régulièrement entre des lignes de piquets. L'échouage s'opère à l'aide d'un rechargement de $0^{m.c.},30$ à $0^{m.c.},50$ d'épaisseur de gravier. Des claies — Figures 34 des planches.

Un grand nombre de ces claies superposées forment également une sorte de tunage, où les piquets directeurs remplacent, pour toutes les couches, les piquets de clayonnage ordinaire. Ces massifs sont employés sur le Rhin pour les noyaux de barrages transversaux.

Les claies sont composées de fascines étendues jointivement les unes à côté des autres, toutes les têtes à une extrémité de la claie; tous les petits bouts vers l'autre; en sorte que l'épaisseur de la claie va en diminuant dans le sens de la longueur. La couche de fascines est maintenue par des perches transversales équidistantes, espacées de $0^{m},50$ à $0^{m},60$, et placées les unes au-dessus, les autres au-dessous de cette couche. Ces perches sont liées entre elles du dessus au-dessous par des harts qui traversent le massif de la couche et l'affermissent. Un saucisson ordinaire de $0^{m},90$ de tour est placé en travers à la tête de la claie, afin d'arrêter le gravier qui sera ultérieurement rechargé pour l'échouage. Figures 35 des planches.

M. l'Ingénieur Desfontaines établit comme suit la composition d'une claie échouée, de 4 mètres sur 3 mètres de surface :

10 fascines,
20 perches ordinaires,
1 perche plus forte, d'un prix triple,
112 harts,
12 piquets,
$2^{m.c.}$ de gros gravier.

Le système des *plates-formes* de revêtissage a été appliqué en Hollande par MM. les Ingénieurs Brisson et Dan de la Vauterie, sur une grande échelle, notamment sur $3200^{m.q.}$. Plates-formes de Hollande.

Les fig. 36 des planches en représentent la composition. L'on y voit que Figures 36 des planches.

les deux couches inférieures se croisant, sont formées chacune de cours parallèles équidistants de 1 mèt. à $1^m,10$, en saucissons ordinaires. Ces cours à tous les points d'intersection, sont liés par le bout d'une corde goudronnée, de 3 mètres de développement et pesant $0^k,15$ par mètre courant. Sur cette espèce de grillage à compartiments, on étend une troisième couche de roseaux fins et bien serrés de $0^m,12$ d'épaisseur. Il faut 10 bottes de roseaux par mètre carré; les bottes ayant, comme il a été dit pour les paillassonnages, $2^m,50$ de longueur et $0^m,25$ de tour.

Sur les roseaux, et transversalement, s'étend la 4ᵉ couche en fascines de $0^m,20$ d'épaisseur. Les fascines sont placées en recouvrement les unes sur les autres; chaque rang reculant d'un mètre sur le rang inférieur.

A cette 4ᵉ couche succède une 5ᵉ également en fascines, mais dans une direction normale à celles du dessous.

Chacune de ces couches exige sept *fascines hollandaises* au mètre quarré, indépendamment des renforts vers les bords de la plate-forme.

Sur cette 5ᵉ couche on replace deux rangs croisés de saucissons, formant les 6ᵉ et 7ᵉ couches, entièrement semblables à ceux des 1ʳᵉ et 2ᵉ couches, et reliés à ces derniers par le reste de la longueur des cordes goudronnées mentionnées ci-dessus.

La plate-forme entière, fortement serrée par les cordes, présente environ 1 mètre d'épaisseur. Sur le dessus on établit, dans les deux sens orthogonaux, des haies de clayonnages d'environ $0^m,40$ de saillie sur la plate-forme. On place ces haies, 1° sur le contour de la plate-forme ou du radeau, où l'on forme deux lignes à environ $1^m,50$ d'intervalle; 2° dans les zones centrales, où les cases sont plus ou moins larges suivant la configuration du terrain sur lequel la plate-forme de défense devra être échouée.

La plate-forme doit être construite sur une plage telle, que les eaux ne puissent l'atteindre que quand le deuxième grillage supérieur en saucissons est posé. Alors elle peut flotter sans inconvénients. On couvre à ce moment sa surface de gazons, et sur une épaisseur telle, que la plate-forme s'enfonce jusqu'au niveau du dessus; puis on l'amène à la remorque jusqu'au lieu d'échouage. Cette dernière opération se fait à l'aide de gazons et de blocaille, qu'on jette avec assez d'ordre pour que les matériaux soient à peu près également répartis.

La rive la plus élevée de la plate-forme est du reste attachée au rivage par une ligne de pieux espacés de 4 en 4 mètres, de 12 à 15 centimètres

de diamètre, 3m,50 de longueur, battus à la dame, et portant, à l'arrasement du dessus de la plate-forme, de fortes chevilles ou traverses.

La construction d'une pareille plate-forme exige, par 100 mètres quarrés, d'après feu M. Brisson :

430 mètres de saucissons, formant 430 fascines hollandaises,
2 couches de fascines, employant 1460 fascines hollandaises,
1000 bottes de roseaux de Hollande,
114 cordes de 3 mètres de longueur l'une, pesant ensemble 51 kilogrammes,
385 piquets de 18 à 20 cent. de tour, et 1m,50 de hauteur,
2150 baguettes ou clayons de Hollande,
128 chevilles d'arrêt des piquets,
33 mètres cubes de gazons au plus,
13 mètres cubes de blocaille.

Pour suppléer à la rareté ou au prix trop élevé de gros libages pour enrochements, on emploie des espèces de *gabions*, dits saucissons *bourrés*. Ce sont des cylindres en clayonnages de 4 mètres de longueur, et de 2m,40 à 2m,50 de tour au milieu de la longueur, contenant 600 déc. cub. de gravier, pesant chargés 1200 kilog., ayant 2,10 de pesanteur spécifique, déplaçant 570 déc. cub. d'eau, et ne pesant plus après leur immersion complète que 628 kilogrammes. Des saucissons et paniers divers, bourrés de gravier.

La confection d'une pareil saucisson exige, d'après M. l'Ingénieur Desfontaines :

7 fascines du Rhin,
0,50 de botte de clayons du Rhin,
0m.c.,60 de gravier.

Le saucisson ressortait à 3f,63, et le mètre cube de volume *occupé* à 1f,61. Figures 37 des planches

Les saucissons sont coulés au fond de l'eau isolément, ou par grouppes, comme il est indiqué dans les figures 37 des planches.

M. l'Ingénieur Desfontaines a imaginé d'y substituer, ou d'employer simultanément des paniers de diverses formes, également en clayonnages; les uns prismatiques, à base rectangulaire, les autres prismatiques, à base triangulaire, enfin d'autres, dits *coniques*, et qui sont réellement ovales.

Les paniers quadrangulaires, dont les dimensions les plus convenables ont été, après divers essais, fixées à 2 mèt. de longueur, 1 mèt. de largeur et 0m,60 de hauteur, pesaient vides 210 kilog., pleins 2290 kilog.,

Figures 38 des planches. avaient pour pesanteur spécifique 2,20; leur déplacement au *plein*, était de $1^{m},04$, et leur poids dans l'eau 1,249 kilog.

Leur confection exige :

11 bottes de branches d'osier du Rhin de $1^{m},50$ de longueur,
4 perches de grande dimension,
$1^{m.c.},20$ de gravier,
1 botte de harts du Rhin,
1 botte de clayons du Rhin.

Le prix du panier échoué était $7^{f},02$, ce qui faisait ressortir le mètre cube de volume occupé à $2^{f},38$.

Les paniers triangulaires, imaginés par M. l'Ingénieur Desfontaines, Figures 39 des planches. ont $2^{m},16$ de longueur; leur base est un triangle équilatéral de $1^{m},30$ de côté. Ils contiennent 1 mèt. cub. de gros gravier. Leur poids à vide est de 144 kilog.; leur poids avec le gravier est de 2877 kilog.; leur pesanteur spécifique 2,18; lors de l'immersion complète avec charge entière ils déplacent $0^{m.c.},86$ d'eau, en sorte qu'ils pèsent encore sous l'eau 1017 kilog.

Leur confection exige :

8 bottes de branches d'osier du Rhin,
3 perches de grande dimension,
0,50 de botte de clayons,
1 mètre cube de gros gravier.

Le prix total d'un de ces paniers est de $6^{f},27$, et celui du mètre cube occupé $3^{f},97$.

Figures 40 des planches. Les grands paniers coniques ou ovales ont 3 mèt. de longueur, $2^{m},10$ de tour au milieu, contiennent $0^{m.c.},50$ de gravier, pèsent vides 96 kilog., pleins 963 kilog.; leur pesanteur spécifique est 2,20; ils déplacent, dans l'immersion complète, $0^{m.c.},43$ d'eau, et pèsent encore sous l'eau 533 kilog.

Leur confection exige :

3,4 bottes de branches d'osier du Rhin,
0,50 de botte de clayons,
$0^{m.c.},50$ de gravier,
2 piquets.

Le prix total d'un panier était de 3 fr., et du mètre cube occupé 2 fr.

On a fait sur les travaux du Rhin des paniers de ces diverses formes, mais de dimensions plus petites, de manière à avoir en quelque sorte une échelle continue et régulière de grandeurs et de poids.

Les paniers divers de formes et grandeurs, les saucissons, les libages ordinaires, ont été employés simultanément par M. l'Ingénieur Desfontaines, à l'exécution de divers grands barrages.

Toutefois M. Desfontaines pense que les paniers prismatiques triangulaires doivent être préférés aux quadrangulaires, parce qu'ils se déforment moins dans l'échouage, tant par suite du pirouettement qui s'opère alors autour de l'axe du prisme que par la résistance des trois perches d'angle.

Les paniers dits coniques, quand ils doivent être échoués isolément pour remplir un vide local, sont traversés à leurs extrémités par deux forts piquets, afin que s'ils ne tombent pas à leur lieu de destination, ils ne puissent pas être roulés ou entraînés par le courant.

Les divers paniers ne sont au reste remplis que sur place et au moment de leur coulage, afin de rendre leur transport plus facile et moins dispendieux.

Le remplissage s'opère par des ouvertures réservées au milieu de leur longueur, et qu'on referme ensuite avec des tampons de roseaux ou avec des petites claies qu'on fixe par des harts.

L'*Architecture hydraulique* de Bélidor, divers ouvrages sur les fortifications, le mémoire de M. l'Ingénieur Desfontaines, inséré dans les *Annales des ponts et chaussées* de 1833, la notice de feu M. Brisson déjà citée, compléteront les documents que les bornes de cet ouvrage forcent de laisser en dehors.

---

## RÉSUMÉ DE LA DIXIÈME LEÇON.

DE LA MAÇONNERIE DES ANCIENS, DE CELLE DES MODERNES. — MÉTHODES DE POSE.

### *Maçonnerie.*

On désigne sous le nom de maçonnerie une masse de construction en pierres de tailles, en moellons ou en briques, unis ou non unis par le moyen du mortier, du plâtre ou d'autres ingrédients.

Il y a donc plusieurs espèces de maçonneries.

La première porte le nom de maçonnerie en *pierres de taille* ou d'*appareil.*

La deuxième s'appelle maçonnerie *en libages.*

La troisième se nomme *petite maçonnerie*, ou maçonnerie *de moellons* ou *de briques.* Chacune des trois espèces précédentes peut être exécutée sans mortier ou autres liaisons, et alors elle s'appelle maçonnerie *en pierres sèches.*

La quatrième espèce est la *maçonnerie de béton.*

## Ire espèce. — *Maçonnerie d'appareil.*

L'art qui détermine l'arrangement des matériaux d'un édifice se nomme l'*appareil.*

L'appareil divise les masses qui composent un édifice, pour les recomposer ensuite suivant des conditions particulières.

Dans l'acception de ce mot appliquée à l'architecture en général, on entend les formes *apparentes* des masses divisées.

La bonté de l'appareil exige la régularité et même l'agrément dans les formes, et surtout la solidité dans les résultats. Pour atteindre ce double but, on subordonne quelquefois l'appareil *visible* à l'appareil *réel.* Dans tous les cas, il faut que la masse divisée par l'appareil soit produite non-seulement avec les formes qui la constituent, mais encore avec la stabilité qu'elle aurait eue sans la division.

Ainsi un mur droit vertical doit être considéré comme un prisme à base rectangulaire; il peut être fractionné sans inconvénient, sous le rapport de la stabilité; en plusieurs tranches horizontales; parce que cette stabilité sera le résultat de l'inertie et de la pesanteur des tranches superposées.

On peut encore fractionner ce même prisme par des sections verticales; mais, pour qu'il y ait stabilité, il faut opérer la division de manière que chaque ligne de séparation dans une tranche, repose sur une portion pleine dans la tranche inférieure : cette disposition s'appelle liaison *en plein sur joint.* En règle générale, les joints doivent toujours être discontinus dans le sens de la résultante des efforts.

Chaque limite des divisions horizontales forme ce qu'on appelle *assise* ou *lit*, et celle de chaque division verticale se nomme *joint.* Les plans correspondants se nomment *lits d'assises*, *plans de joints.*

Les lits d'assises sont parallèles. Quand les hauteurs des tranches

d'assises sont égales, l'appareil s'appelle *appareil à assises réglées.*

Maçonnerie d'appareil des anciens

Les anciens étaient dans l'usage d'employer, dans la construction de leurs monuments, des blocs des plus fortes dimensions. On a trouvé dans les ruines de Persépolis des pierres qui ont (16m,89) 52 pieds de longueur sur (1m,95) 6 pieds de hauteur et autant de largeur. Ces blocs cubent (64m.c.,21) 1872 pieds, et doivent former un poids d'environ (195802 kil.) 400 milliers. Au grand temple de Balbec on voit des blocs plus considérables encore; et il existait dans la carrière d'où ils ont été tirés, et qui est voisine du temple, un bloc qui avait (22m,41) 69 pieds de longueur sur (4m,16) 12 pieds 10 pouces de largeur, et (4m,30) 13 pieds 3 pouces d'épaisseur. Il formait un cube de plus de (342m,77) environ 10000 pieds, et son poids devait être d'environ (979010 kil.) deux millions de livres.

Le constructeur le plus hardi doit être effrayé lorsqu'il pense aux moyens qu'il a fallu employer pour mouvoir et transporter de pareilles masses.

Les anciens apportaient le plus grand soin pour que les surfaces des pierres qui se touchaient fussent dressées avec précision; les joints, qui étaient l'arête visible de ces surfaces, étaient à peine sensibles. Cette perfection dans la juxtaposition de ces pierres a fait croire que, pour l'obtenir, les anciens employaient le moyen du frottement, opéré par les blocs eux-mêmes qu'ils faisaient mouvoir circulairement les uns sur les autres.

Lorsque les blocs n'avaient pas ces grandes dimensions qui rassuraient les anciens sur leur stabilité, ils employaient des crampons de fer, quelquefois de bronze, pour lier les blocs et ne former qu'une seule masse.

Les murs du temple de la Concorde, à Agrigente, présentent des exemples de cette espèce de construction. Les assises, formées de pierres d'égales dimensions en tous sens, taillées sur toutes leurs faces avec le plus grand soin, sont liées par des crampons de cuivre; l'exécution de cette maçonnerie est si parfaite, que dans des temps de beaucoup postérieurs à la construction de ce temple, on a percé des arcades dans les murs latéraux, en évidant le cintre, sans égard à l'appareil des assises qui ont été coupées par cette opération. Cependant les pierres se soutiennent, bien que quelques-uns des piédroits aient été ruinés, et l'on voit avec étonnement que cette démolition n'a occasionné aucune désunion dans la partie supérieure du mur. La longue durée de ce monument

et sa conservation sont évidemment dues aux soins particuliers qu'on a apportés à sa construction.

L'appareil des monuments antiques n'est pas toujours aussi simple que celui du temple d'Agrigente. Les Grecs, surtout, employaient diverses combinaisons dans l'arrangement des blocs. Chacune de ces combinaisons avait un nom particulier.

Ils nommaient διατονοι (*diatonoi*) l'arrangement de pierres dont la longueur était double de la largeur, et qui présentaient alternativement, sur le parement du mur, vertical ou incliné, leur face carrée et leur face oblongue; c'est ce que nous désignons sous le nom de *carreaux* et *boutisses*. Quand toutes les assises étaient d'une hauteur égale, c'était alors l'espèce de maçonnerie nommée ισοδομων (*isodomon*); il fallait deux pierres accolées pour former l'épaisseur du mur, lorsque leur plus longue face était en parement; une seule suffisait dans le cas contraire, et alors ce bloc formait ce que nous appelons *parpaing*. On trouve beaucoup d'exemples de ce genre d'appareil dans les anciens monuments de Rome.

Quelquefois toutes les assises n'étaient pas d'égale hauteur; mais dans ce cas, celles d'une moindre étaient régulièrement interposées entre celles d'une plus grande hauteur. Les petits blocs avaient les $\frac{2}{3}$ des dimensions des plus grands, en longueur et en largeur; il en fallait deux de ces derniers et trois des premiers pour former l'épaisseur du mur. Cette combinaison d'appareil était le ψευδισοδομων (*pseudisodomon*) des Grecs.

Lorsque les deux différents appareils dont on vient de parler ne formaient pas l'épaisseur entière d'un mur, pilastre ou colonne, et que les parements seulement étaient construits en pierre de taille, le remplissage de l'intervalle entre ces parements se faisait en petite maçonnerie de moellon. Cette construction était l'εμπλεκτον (*emplecton*) des Grecs.

Il y avait encore une autre combinaison d'appareil antique, appelée par les Latins *opus incertum*, et *cyclopéenne* par les modernes. Elle était formée par des blocs dont les figures étaient irrégulières. Ce genre de construction, dont on trouve beaucoup d'exemples dans les monuments antiques, était particulièrement employé pour les murs d'enceinte des villes. On se servait pour cette maçonnerie de blocs à grandes dimensions, ou de petites pierres. Lorsque la construction avait lieu avec cette dernière espèce de pierre, c'était le véritable *opus incertum* des Romains, qui appartient à la deuxième classe des maçonneries.

Maçonnerie d'appareil des modernes.

Ces détails de construction des monuments des anciens attestent les soins qu'ils prenaient pour la beauté et la solidité de leur maçonnerie d'appareil. Nous les imitons dans la construction de nos ponts et dans celle de quelques-uns des monuments publics, mais ces exemples sont en général perdus pour les constructions ordinaires : l'ignorance de la plupart des particuliers qui font bâtir, la cupidité des entrepreneurs, l'insouciance d'une partie des architectes, avaient fait prévaloir à Paris, et dans la plupart des départements, une méthode de poser la pierre de taille méconnue des anciens, expéditive et économique, à la vérité, mais essentiellement vicieuse ; c'était la méthode de poser sur *calles de bois* dans les maçonneries en élévation.

C'est à cette méthode de pose qu'étaient dus, en grande partie, les tassements et les mouvements qui avaient donné des inquiétudes sur la solidité de l'un des monuments les plus célèbres de cette capitale ; il est généralement reconnu que c'est l'emploi de calles et le démaigrissement des lits de pierres qui formaient les piliers du Panthéon français (dans le but d'obtenir des joints de lits très-serrés et à vive arête) qui avaient occasionné la ruine de ces piliers qu'on a été obligé de reconstruire.

Cette méthode de pose est proscrite depuis longtemps des travaux des ponts et chaussées et des fortifications ; et dans les ouvrages confiés à ces corps d'ingénieurs, on s'est beaucoup rapproché de la manière de poser employée par les anciens.

Le motif qui détermine les ouvriers à poser sur calles, c'est que cette méthode leur procure une pose prompte et facile, et qu'elle exige peu de retaille et de ragréments après la pose. On peut en effet, au moyen de calles plus ou moins élevées, poser une pierre, malgré des défauts de taille des lits, de manière que son parement satisfasse à celui du mur que l'on construit, et que son lit supérieur se trouve dans le plan général de la hauteur de l'assise. Cette facilité de pose est encore augmentée par le démaigrissement des lits.

Une pierre ainsi placée et échafaudée sur quatre calles, formant un joint de lit souvent de près de ($0^{m},027$) un pouce de hauteur, est garnie de plâtre ou de mortier fluide. Pour faciliter le travail, on se sert d'une fiche en fer, et l'on ferme l'ouverture des joints avec des étoupes ou de la filasse qu'on enlève lorsque les mortiers ont pris de la consistance.

Il résulte de cette méthode de pose, que le mortier diminuant de volume par la dessiccation, le poids d'une partie de l'édifice est supporté par les

calles, ce qui occasionne des porte-à-faux, et souvent la rupture des pierres vers le milieu de leur longueur; ou bien, ce qui est encore plus grave, la pression fait éclater les pierres parallèlement au parement. C'est ce qui arrive ordinairement lorsque, pour avoir en apparence des joints serrés, ainsi qu'on l'avait pratiqué aux piliers du Panthéon, on a commencé le démaigrissement des lits à (0$^{m}$,027, ou 0$^{m}$,054) un pouce ou deux de l'arête du parement.

On pourrait, à la vérité, diminuer une partie des inconvénients attachés à cette méthode de pose, en employant, au lieu de calles de bois, des calles en pierres, tuileaux durs ou des lames de plomb qui, étant compressibles, permettent aux pierres de tasser graduellement sans secousses à mesure que les mortiers s'affaissent. Alors l'effet de la pesanteur se transmet sur toute la superficie des lits; mais cette précaution qui augmente la dépense de construction n'est qu'un palliatif; on doit y renoncer pour les grands travaux, surtout pour les ouvrages hydrauliques. Elle ne peut être admise sans inconvénient, que pour la construction des voûtes des dômes, circonstance où elle présente quelques avantages, eu égard à la difficulté des ragréments.

La méthode de pose qu'il est essentiel de substituer à celle au moyen des calles dont on vient de montrer les inconvénients, est celle qu'on nomme *pose à bain de mortier*.

Avant d'expliquer cette méthode, il est nécessaire de dire un mot de l'appareil.

Dans les grands travaux, où les épaisseurs considérables des maçonneries en élévation ne permettent que rarement aux pierres de former *parpaing*, on emploie un système d'appareil qui se rapproche de l'*empleeton* des Grecs; c'est ce que nous appelons, ainsi que nous l'avons dit, appareil par *carreaux* et *boutisses*. Il forme, par sa disposition, une excellente liaison entre la maçonnerie en pierre de taille des parements et celle en moellon qui constitue l'intérieur des murs.

On appelle carreaux celles des pierres de taille dont la dimension la plus longue est posée en parement. Les boutisses sont au contraire celles qui ont en parement leur moindre dimension dans le sens horizontal; la plus longue est ce qu'on nomme la queue de la pierre. Ces deux espèces de pierres sont posées alternativement à côté l'une de l'autre, et forment une épaisseur inégale d'appareil. La division de la superficie totale du lit supérieur ou inférieur d'une assise d'un mur droit, par la longueur de

l'assise, donne au quotient ce que l'on appelle l'*appareil réduit*.

Quoique les dimensions des blocs dépendent essentiellement de la richesse des carrières dont on dispose, et de la grandeur de l'édifice qu'on construit, il doit cependant y avoir un certain rapport entre les dimensions des carreaux et des boutisses, pour concilier, autant que possible, les avantages de la plus grande stabilité et du *maximum* de résistance des pierres, maximum sur lequel, à surface égale, la figure de cette surface influe singulièrement.

L'expérience a appris que pour de la pierre d'une dureté moyenne, on devait donner de longueur aux carreaux environ trois fois leur hauteur, et en largeur deux fois cette même hauteur. Les boutisses peuvent avoir les mêmes dimensions à peu près.

Lorsqu'on emploie de la pierre très-dure, et qui porte plus d'un pied (0,$^{m}$326) de hauteur d'appareil, on peut donner en longueur aux carreaux jusqu'à 5 fois leur hauteur, et de 2 à 3 fois cette hauteur pour largeur.

L'économie ne permet pas que l'on réduise exactement toutes les pierres aux dimensions indiquées, et que tous les blocs soient semblables; dans la pratique on se contente d'approcher de cette règle.

Quelle que soit l'espèce de pierre qu'on emploie, on doit éviter les carreaux qui ont une trop grande longueur, c'est-à-dire qui excèdent 6 fois la hauteur d'appareil. On ne peut se permettre de s'écarter de cette règle que lorsqu'il s'agit de pierres de couronnement d'un grand ouvrage et qui font *parpaing*. Les longues pierres employées avec succès pour les parties rampantes du fronton du Louvre, et aux parapets du pont de Neuilly, autorisent cet usage; mais, dans ce cas, il faut que les lits soient travaillés avec soin, pour éviter des porte-à-faux qui en occasionneraient la rupture.

Au reste, l'on peut se rendre compte, dans chaque cas particulier, des rapports maximum à établir entre la longueur et la hauteur des blocs, d'après les formules de résistance; en calculant la charge que ces blocs auront à supporter, et en supposant; tantôt qu'elle pèse au milieu de leur longueur, et que les extrémités sont encastrées ou simplement appuyées; tantôt que cette charge pèse à une des extrémités des blocs, et que l'autre extrémité est encastrée.

Avant de poser une pierre suivant la méthode dite *à bain de mortier*, on dérase le lit supérieur de l'assise inférieure sur laquelle cette pierre doit être posée; on l'établit de niveau, suivant le plan d'assise : on pré-

sente le bloc en place, et l'on examine, au moyen du plomb, de l'équerre et du niveau de poseur, si les lits sont bien dressés d'équerre au parement, s'il est question d'un mur droit; ou suivant l'angle d'inclinaison, s'il s'agit d'un mur en talus : on vérifie si ces lits sont bien dégauchis; si les joints, verticaux ou inclinés, sont conformes aux tracés. Enfin, ce n'est qu'après avoir reconnu que la pierre est taillée de manière à obtenir une juxta-position exacte avec les blocs voisins, qu'on procède à la pose à demeure sur le lit de mortier qui doit la recevoir.

Si, pour obtenir une juxta-position exacte, on était obligé de sacrifier la taille du parement, c'est-à-dire que, si pour faire joindre parfaitement les lits inférieur et de joint, il fallait poser la pierre en saillie sur le nu du mur, il faudrait ne pas hésiter à le faire. Dans ce cas, on trace, sur le lit supérieur de la pierre, une ligne qui passe par le plan du parement du mur; cette ligne indique la position du nouveau parement qui devra être taillé en place et après la pose.

On relève alors la pierre ainsi présentée; après avoir nettoyé et mouillé le lit de l'assise inférieure, on y étend une couche bien égale de mortier de ciment fin, d'environ huit lignes ($0^m,018$) d'épaisseur; on garnit aussi d'une couche de mortier le joint vertical du bloc voisin; l'ouvrier repose alors la pierre sur la couche de ciment, la met en place au moyen de la pince du poseur; il la serre en joint, et après avoir de nouveau vérifié sa position à la règle, à l'équerre et au niveau, il la frappe avec un maillet de bois, jusqu'à ce que le mortier superflu soit sorti en refluant par les joints sous l'effort de la pression.

Il est évident qu'une assise de pierre de taille ainsi posée, n'ayant aucun vide dans ses joints, s'appuyant sur une couche de mortier d'une épaisseur à peu près égale, et par conséquent également compressible, doit obtenir ultérieurement une stabilité inaltérable, tant par la bonne assiette des pierres, que par la force d'adhésion des mortiers qui lient entre elles les différentes assises, et qui répartissent les poids supérieurs sur les lits de ces assises.

Liaison des pierres.

A l'imitation des anciens, quelques constructeurs modernes ont cherché à ajouter à la solidité des constructions qui résulte de la pose à bain de mortier; ils ont imaginé des liaisons intérieures produites par des tenons et des ressauts ménagés dans les lits et dans les joints des blocs. Ce moyen a été souvent essayé, surtout dans la construction des ouvrages à la mer, où les maçonneries sont exposées au choc des vagues avant que les mor-

tiers aient pris la consistance nécessaire à la résistance qu'elles doivent opposer. Mais ce moyen n'a répondu à l'idée avantageuse qu'on s'en était formée, que par une précision dans la taille telle que les surfaces des différents plans, ainsi multipliés, se touchassent. Elle est difficile à obtenir des ouvriers. Ils laissent souvent des vides entre des pierres qui alors ne se touchent et ne sont supportées que par quelques points; et il peut résulter ainsi de l'emploi de ces moyens qu'au lieu de consolider les maçonneries, ils en occasionnent la ruine.

Ces inconvénients ont fait souvent renoncer à ce mode de liaison entre les blocs, et fait préférer celui des crampons en fer ou en cuivre qui attachent ensemble tous les blocs d'une assise. Ce qui vaut mieux encore, c'est l'emploi de larges bandes de fer ou de cuivre, nommées *ancres*, que l'on encastre sur le lit supérieur d'une assise, dans tout son développement; chacun des blocs qui composent l'assise est percé d'un trou vertical qui correspond à celui qui est préparé dans l'ancre; et au moyen d'un fort boulon qui traverse l'ancre et la pierre, une assise peut être considérée comme formée d'un seul bloc. Pour ajouter encore à la solidité de ce moyen, on prolonge quelquefois les trous à travers une ou deux assises inférieures; et le boulon prolongé qui les traverse, les lie ensemble de manière qu'un bloc ne peut être déplacé sans entraîner dans son déplacement plusieurs assises. Ce moyen paraît applicable aux ouvrages à la mer, et à la construction de ceux qui sont destinés à recevoir des chocs, ou à résister à de fortes poussées horizontales.

Mais le fer, en s'oxidant surtout dans les ouvrages à la mer, augmente de volume, et a déterminé quelquefois, par sa force de dilatation, la rupture des pierres. D'un autre côté, le prix élevé du cuivre en limite beaucoup l'usage.

L'emploi dans les joints des lits des pierres, de plâtres-ciments ou de mastics en fusion, paraît préférable aux procédés indiqués plus haut.

Le scellement des crampons, des ancres, des boulons, dans les pierres, se fait ordinairement avec du plomb. Ce moyen est le plus solide, mais il exige une dépense considérable : on peut lui substituer, le fer oxidé par le vinaigre, le soufre et des mélanges par la fusion, du soufre avec la résine et la cire jaune.

### IIe espèce. — *Maçonnerie de libages.*

Les *libages* sont des pierres de taille de médiocre qualité qui s'emploient sans être taillées, c'est-à-dire n'ayant reçu que l'ébauche de carrière. Ils forment une maçonnerie semblable, pour la solidité, à celle en pierre de taille : et qui peut être, comme cette dernière, posée à sec ou à bain de mortier. Dans ce dernier cas, l'abondance du mortier, comme moyen de liaison, est nécessaire afin que l'assiette exacte des libages obtenue par la percussion d'une lourde masse, fasse refluer le mortier et lui fasse remplir les joints et les vides nombreux que doivent présenter des blocs qui ne sont que grossièrement taillés.

Cette espèce de maçonnerie en libages s'emploie avec succès pour la fondation des grands édifices, surtout pour celle des ponts, et en général pour les ouvrages dans l'eau.

La maçonnerie en libages à pierres sèches, est souvent appliquée aux murs de soutènement des terres; mais son usage principal est dans les digues ou *jetées* à la mer. L'expérience a prouvé que les vides entre les blocs brisaient et éparpillaient l'action des vagues, et que le jeu que les matériaux pouvaient prendre, le déversement des eaux dans les vides des blocs consumaient la force vive dont ces vagues étaient animées. L'on voit sur les côtes de l'Océan, les plus battues par la mer, une foule de digues en gros blocs irréguliers, construites par de simples pêcheurs, résister presque indéfiniment aux tempêtes; bien qu'on n'y ait pas apporté les soins qu'on aurait obtenus avec des ouvriers de profession dirigés par des hommes de l'art. Ce système perfectionné par l'arrangement des gros blocs en assises régulières et par leur pose en boutisses est beaucoup moins dispendieux que celui des maçonneries en mortier, parementées en pierre de taille. Il avait été proposé par M. *Lambardie* fils, Inspecteur général des travaux maritimes, pour l'exécution de la muraille verticale qui complétera la hauteur de la digue de Cherbourg, au-dessus de l'empatement en pierres perdues.

### IIIe espèce. — *Maçonnerie en moellons, ou petite maçonnerie des anciens et des modernes.*

Cette troisième classe de maçonneries comprend les constructions que l'on forme avec le moellon, la blocaille ou la brique; réunis ou non au moyen du mortier ou du plâtre.

Maçonneries en petits matériaux des anciens.

Les anciens, les Grecs surtout, nous ont laissé dans ce genre de maçonnerie, ainsi que pour celle d'appareil, des modèles à imiter.

Vitruve est entré dans les plus grands détails sur les diverses espèces de maçonnerie des Grecs et des Romains : nous allons présenter les principaux.

Les Grecs distinguaient cinq espèces de maçonnerie en général; elles comprennent les divisions que nous avons adoptées ci-dessus pour leur classement. Les trois premières espèces, qui sont l'*Isodomon*, le *Pseudisodomon* et l'*Emplecton*, ont été décrites et examinées dans la première classe de maçonnerie à laquelle elles appartiennent; les deux dernières espèces, citées et nommées par Vitruve, sont l'*Opus incertum* et l'*Opus reticulatum*, qui appartiennent particulièrement à la troisième classe : elles vont faire l'objet de nos recherches, et nous comparerons les procédés et les résultats de cette maçonnerie ancienne avec ceux de maçonneries modernes.

Dans l'*opus incertum* des anciens, que nous nommons maçonnerie à joints *incertains*, les parements de maçonnerie du mur sont formés par des moellons bruts de figure irrégulière; ils sont posés les uns à côté des autres, sans ordre ni rang d'assises, mais en liaisons en tous sens. Cette espèce de maçonnerie remonte à la plus haute antiquité : elle a été en usage à Rome jusque vers le temps des empereurs; plusieurs ruines de monuments de cette époque en sont la preuve.

L'intervalle derrière les parements de l'*opus incertum* était rempli en maçonnerie de blocaille, à bain de mortier; c'était une espèce de béton. Ce remplissage était coulé dans un encaissement semblable à celui dont on se sert pour le pisé; moyen de construction qui rendait cette méthode expéditive; par la massivation du béton elle était susceptible d'acquérir une grande solidité.

Les arêtes des maçonneries ainsi construites avaient besoin d'être consolidées par des parties de maçonnerie d'appareil, ou de maçonnerie de libage à lits horizontaux, afin de retenir les pierres de l'*opus incertum*, qui, par leur position, tendaient à rouler. Dans quelques édifices ces angles étaient exécutés en briques.

En blâmant la méthode des Romains, qui, en construisant l'*emplecton* des Grecs, supprimaient les pierres *diatonoi*, ou qui forment parpaing; Vitruve remarque un vice de construction qui est particulièrement applicable à l'*opus incertum*, et même à l'*opus reticulatum*; c'est de former dans

le sens de l'épaisseur du mur des bandes de maçonnerie de construction différente, et d'occasionner, par conséquent, des désunions qui sont l'effet des tassements inégaux qui doivent résulter de ces diverses maçonneries.

Cette observation est fondée, mais il est probable que l'opération de la massivation remédiait à cet inconvénient; car on ne remarque aucune désunion dans les masses de cette espèce de maçonnerie, dont on trouve beaucoup d'exemples dans des monuments antiques bien conservés.

L'*opus reticulatum*, ou *maçonnerie réticulaire*, était parementée avec de petites pierres de forme carrée, ce qui présentait à l'extérieur la figure d'un réseau, d'où cette espèce de maçonnerie avait pris son nom. L'intérieur, ainsi que dans l'*opus incertum*, était rempli de maçonnerie de blocaille ; il se construisait par les mêmes moyens, et les angles avaient également besoin d'être fortifiés par des assises de fort appareil et à lits horizontaux, ou des maçonneries de libage.

Les carrés qui formaient les parements étaient en échiquier : ils avaient ordinairement (0m,081) 3 pouces de côté, et (0m,135 à 0m,162) 5 à 6 pouces de longueur de queue, pour former liaison avec le remplissage intérieur.

Cette maçonnerie, qui présente des parements agréables à la vue, était fort en usage à Rome dans les derniers temps de la république et sous les empereurs ; elle a remplacé l'*opus incertum*, dont on a cessé de faire usage à cette époque.

Les vastes et superbes ruines de la *Villa Adriana*, près Tivoli, présentent presque toutes une maçonnerie *réticulaire* exécutée avec beaucoup de soin. Quelques parties de ces maçonneries étaient revêtues de lambris de marbres; dans les ruines des Thermes, de Titus et de Dioclétien, à Rome, on aperçoit les trous des crampons ou agrafes qui fixaient les panneaux de marbre dont étaient recouverts ces murs de maçonnerie *réticulaire*.

Les Romains ont aussi connu la maçonnerie de moellon par rangées ou assises parallèles. On voit une ruine d'une ancienne fabrique près la tour *Metella*, aux environs de Rome, qui a été ainsi construite. Cette maçonnerie, très-régulière, est dans le genre de l'*isodomon* des Grecs, c'est-à-dire, que toutes les assises de moellon ont la même hauteur : ces moellons ont tous (0m,217) 8 pouces de long, sur (0m,217) 8 pouces de large, et (0m,081) 3 pouces de hauteur. Notre maçonnerie moderne en moellons piqués est une imitation de cette espèce d'anciennes maçonneries.

De ces diverses maçonneries des Grecs et des Romains, les modernes n'ont adopté que celle à rangs parallèles, et principalement le *pseudisomon* des Grecs, c'est-à-dire, celle qui n'exige pas que toutes les assises de moellons soient égales entre elles : telle est notre maçonnerie ordinaire, appelée à Paris *limousinage* ou *smillage*, dont nous parlerons bientôt.

Maçonneries en petits materiaux des modernes.

Notre première sous-espèce de maçonnerie, c'est celle en *moellons piqués*; elle s'emploie à la construction des revêtements de murs, tels que les murs de soutènements; à celle des radiers, carrelages du sol, qui exigent quelque apparence de solidité et de propreté; elle ne doit pas être recouverte d'un enduit.

La bonne construction de cette maçonnerie exige que les moellons qui forment les parements soient bien équarris et proprement taillés à la *tranche*; elle veut encore que les lits et joints soient dressés d'équerre au parement. On pose ces moellons en liaison et à bain de mortier; enfin, dans les maçonneries à élévation, ils doivent former une suite de carreaux et boutisses, afin de lier les moellons des parements avec la maçonnerie de l'intérieur du mur.

Lorsque cette espèce de maçonnerie est bien exécutée, elle est très-solide et fait un bon effet à la vue. Si l'on y ajoute des chaines de pierre de taille dans les angles, pour l'encadrer, et former des bossages et des refends, elle ne dépare pas une belle masse d'architecture, qu'elle enrichit en formant une variété d'appareil qui plait.

La deuxième sous-espèce de maçonnerie moderne de moellon, c'est le *limousinage* ou *smillage*. Elle ne diffère de la précédente, qu'en ce que les moellons, au lieu d'être taillés, sont employés presque bruts, et qu'on ne s'assujettit pas à avoir des hauteurs d'assises égales. Les lits des moellons doivent cependant être gisants. Ils ont naturellement cette qualité lorsqu'ils proviennent de carrières calcaires dont les bancs sont bien prononcés. Dans le cas contraire, on doit ébaucher ces lits au marteau.

Cette deuxième sous-espèce pourrait être également à pierres sèches, ainsi qu'il y en a des exemples dans des revêtissages de digues, jetées, épis à la mer. Mais généralement à raison de la dépense qu'entraine la régularité des parements, il y aurait une sorte de contradiction à vouloir économiser ici le mortier.

La troisième sous-espèce de maçonnerie de moellon, dite *ordinaire*, est

formée de moellons irréguliers, grossièrement taillés sur le *tas*, mais posés autant que possible en *carreaux* et *boutisses*.

Cette maçonnerie peut être exécutée à pierres sèches, avec *argile* amollie, ou en mortiers de diverse qualité. La maçonnerie de moellons à pierres sèches, est employée particulièrement pour soutenir des reliefs de terres, revêtir des parois plus ou moins inclinées. Elle exige des moellons plats, bien gisants, et forme un excellent apprentissage pour les ouvriers maçons.

La maçonnerie avec *argile* est réservée à des constructions provisoires ou temporaires, à des clôtures peu importantes, à des habitations particulières de faible prix. Pour éviter les effets de l'humidité ou de la gelée sur l'argile, et sur la stabilité des maçonneries; celles-ci doivent être exécutées comme s'il n'y avait rien dans les lits et joints, et être protégées à leur couronnement par des surfaces très-inclinées, qui évacuent les eaux; enfin ces surfaces comme celles des parements, ont besoin d'être rejointoyées en mortier.

Pour obtenir une bonne maçonnerie ordinaire de moellons durs et de mortier, il est essentiel, avant de poser la couche de mortier qui doit recevoir les moellons, que l'ouvrier nettoie et mouille la couche de maçonnerie précédemment faite; il faut qu'il enlève la terre ou les autres substances qui peuvent être attachées aux moellons, et qu'il mouille ceux-ci pour mieux les disposer à prendre le mortier; il doit toujours les poser en liaison et à bain de mortier; leur procurer à coups de marteau une assiette sûre, et les frapper jusqu'à ce que chaque moellon ait pris sa place. Il est encore nécessaire que l'ouvrier garnisse tous les vides des joints occasionnés par la figure irrégulière des moellons, avec des éclats de pierre, enfoncés au marteau dans le mortier qui doit remplir tous les vides des joints. Enfin, s'il s'agit de maçonneries de murs en élévation, il est indispensable d'élever le mur également des deux côtés, par assises, et d'arraser l'intérieur au niveau de la hauteur des moellons qui forment les parements.

On n'a pas toujours à sa disposition des moellons bien gisants, provenant de bancs calcaires; on n'a quelquefois que des produits volcaniques de forme irrégulière; ailleurs ce sont des silex roulés qu'il faut employer: ces diverses substances n'en sont pas moins bonnes pour faire d'excellentes maçonneries. Si elles n'ont pas, comme les pierres calcaires, l'avantage d'être bien gisantes; elles ont ordinairement la propriété de contracter avec les mortiers une plus forte adhésion, et lorsqu'on a eu le soin de bien garnir les

vides et de poser ces espèces de moellons à bain de mortier de bonne qualité. Les masses de maçonnerie qui en sont formées obtiennent ultérieurement une grande solidité.

La pose des maçonneries de toute espèce exige la plus grande surveillance pour être convenablement exécutée. Il est essentiel de ne pas perdre de vue les ouvriers qui sont chargés de ce travail, qu'il ne faut jamais mettre à la tâche, à cause des malfaçons graves et faciles à déguiser, qui en sont ordinairement la suite; d'ailleurs la main-d'œuvre de pose est en si faible proportion avec la valeur des matériaux rendus à pied-d'œuvre, qu'une économie sur cet objet serait insignifiante pour la dépense totale. Les nombreux exemples de résultats fâcheux provenus d'une maçonnerie mal exécutée, doivent mettre en garde et éveiller l'attention de l'Ingénieur, qui est toujours responsable du succès des travaux qui lui sont confiés.

A Paris, où le plâtre est abondant et de bonne qualité, la plupart des maçonneries ordinaires, au lieu d'être faites en mortier, se construisent avec le plâtre. Les ouvriers abusent souvent de la propriété qu'a cette substance de prendre sur-le-champ une forte consistance; et loin de s'occuper de dresser les lits de moellons avant leur emploi, ils les posent ordinairement tels qu'ils se présentent et sans précautions. L'enduit de plâtre qui doit recouvrir ces murs cache toutes ces malfaçons; et si des murs en élévation de 18 pouces ($0^m,50$) d'épaisseur, très-élevés, et percés d'un grand nombre de croisées, résistent aux fardeaux des planchers et des combles qu'ils supportent, on ne le doit qu'à la force d'adhésion du plâtre, force qui est considérable immédiatement après son emploi; mais comme elle décroît avec le temps, les édifices ainsi construits ne peuvent durer; il est rare que cette durée excède un demi-siècle, et pendant cet intervalle on est obligé d'y faire de fréquentes réparations.

Le gonflement du plâtre est aussi une des causes du peu de durée des constructions auxquelles cette substance est employée; il tend à faire gauchir les murs, lorsqu'à leurs extrémités ils sont contenus par des constructions voisines; ils perdent quelquefois leur aplomb, et par conséquent leur stabilité.

Ces considérations sur les maçonneries en plâtre doivent empêcher d'employer cette substance comme mortier, lorsqu'il s'agit de la construction de grands édifices et de monuments publics destinés à subsister pendant plusieurs siècles.

### IVe espèce. — *Maçonnerie de briques.*

La maçonnerie de briques est excellente pour toutes les espèces de constructions ; sa qualité d'être, sauf celle de béton, plus imperméable à l'eau qu'aucune autre espèce de maçonnerie, la rend propre surtout aux ouvrages hydrauliques, quand la brique très-cuite est presque vernissée ou émaillée par le feu.

L'exécution de cette espèce de maçonnerie est la plus facile de toutes, à cause de la régularité des prismes dont elle est formée. Le soin que l'ouvrier doit prendre, c'est de bien nettoyer la brique et de l'imbiber d'eau avant de la poser sur le lit de mortier qui doit la recevoir ; de l'assurer dans la place qu'elle doit occuper, en la pressant sur son lit de mortier avec la main et le marteau, ou simplement avec la tranche de la truelle. Les liaisons s'obtiennent facilement, puisque toutes les briques sont de mêmes dimensions ; et que leurs dimensions usuelles de longueur et de largeur sont multiples l'une de l'autre, et de l'épaisseur.

On varie les combinaisons de pose suivant les épaisseurs des murs, et les résultats doivent être tels que les briques d'une assise ou rangée, croisent celles des assises inférieures ou rangées adjointes, et qu'il n'y ait pas continuité dans les joints et lits, ni dans le sens de la longueur, ni dans celui de l'épaisseur des maçonneries.

Il est encore un genre de maçonnerie mixte, ordinairement formé d'assises de briques régulièrement entremêlées avec des assises de petits moellons piqués, et quelquefois avec des silex. Les parements de ces silex se font par un coup de marteau dont on les frappe.

On voit plusieurs exemples antiques de cette espèce de maçonnerie ; quelques monuments gothiques en fournissent aussi. Ce genre de maçonnerie, qui ne présente rien de particulier relativement à sa construction, est à peu près abandonné comme exigeant des mains-d'œuvre plus dispendieuses, sans aucun avantage sous le rapport de la solidité.

### Ve espèce. — *Maçonnerie en béton ; — aires ou pavés.*

Le béton dont nous avons parlé à l'article des mortiers avec lesquels il a dû être classé, peut être encore considéré comme une espèce de maçonnerie, relativement à l'usage qu'on en fait pour les constructions dans l'eau

et à l'air. L'on a déjà indiqué les moyens, de manipulation pour sa fabrication, et quelques-unes de ses applications.

L'homogénéité de ce composé artificiel, la possibilité d'obtenir par son emploi, sous l'eau et sans batardeaux, des maçonneries imperméables ne formant en quelque sorte qu'un seul bloc, en multiplieront l'usage de plus en plus, dans les constructions de toute espèce, et particulièrement dans les constructions hydrauliques destinées à retenir l'eau et à résister à des charges d'eau latérales ou de fond sans être traversées par les filtrations.

Les limites dans lesquelles ce Cours doit être renfermé ne nous permettent pas de nous occuper particulièrement des aires ou pavés des édifices, que les Romains construisaient avec une espèce de mortier ou béton, lorsqu'ils n'employaient pas le marbre lui-même. Ces mortiers imitaient le marbre par la beauté du poli dont ils étaient susceptibles et par leur dureté. Cet usage s'est perpétué en Italie, et l'on y construit des pavés de marbre factice, dont la base est le mortier de pouzzolane mêlé avec des fragments de marbre que l'on polit à la manière du marbre lui-même. Ces constructions, qui ont lieu au rez-de-chaussée, et même sur les planchers des étages élevés des maisons des particuliers, sont très-communes dans les états de Venise et à Rome; elle valent bien mieux que nos pavés d'appartements en carreaux de terre cuite, auxquels il serait avantageux, sous tous les rapports, de les substituer.

*Observations générales sur les maçonneries de toute dénomination.*

Les maçonneries de toute espèce en élévation éprouvent des tassements d'autant plus sensibles qu'elles *ont été exécutées plus rapidement*. Ce tassement varie suivant la nature des matériaux et la charge qu'ils ont à supporter; ainsi dans un mur vertical percé d'ouvertures, les charges sur les zônes des *trumeaux* voisines des vides sont plus grandes que dans les zônes centrales, et peuvent déterminer, par l'inégalité des tassements, des fissures de séparation. Des chaînes verticales en pierres de taille tasseront moins que des maçonneries de briques ordinaires, et beaucoup moins que des maçonneries en moellons ordinaires qui leur seront adjacentes.

Dans la réunion de maçonneries anciennes avec des maçonneries nouvelles, des disjonctions peuvent résulter des tassements de ces dernières.

Les constructeurs doivent prévoir et prévenir ces effets dans la conduite des travaux.

# RÉSUMÉ DE LA ONZIÈME LEÇON.

DE LA RÉSISTANCE DES MAÇONNERIES ET DES DIMENSIONS A LEUR DONNER RELATIVEMENT AUX CHARGES A SUPPORTER, ET NOTAMMENT, DANS LES SOUTÈNEMENTS DE TERRES, RADIERS ET VOUTES.

Les diverses fonctions des maçonneries peuvent se résumer comme il suit :

1° Former des séparations d'espaces, de manière que les maçonneries n'aient que leur propre poids à supporter ;

2° Servir de supports verticaux ou inclinés aux charges dirigées dans un sens parallèle à la longueur.

3° Résister, comme dans les fondations ou planchers, à des charges qui, dirigées perpendiculairement aux parois, tendent à les soulever ou à les briser ;

4° Résister, comme dans les murs de soutènement de terres ou d'eaux ; dans les murs de support de charpente en bois ou en fer, à des pressions également perpendiculaires aux parois, mais qui tendent à les faire glisser, pirouetter ou rompre.

On peut assimiler à ces murs, les maçonneries qui, dans certaines contrées du globe, sont exposées à des ouragans d'une grande violence.

5° A former des voûtes qui, sous leur propre poids et les charges supérieures, ne tendent pas à se déliaisonner et à rompre ;

6°. Enfin, supporter les voûtes dont la poussée, tend à faire glisser, pirouetter ou rompre leurs piédroits.

*Maçonneries considérées comme clôtures de séparations verticales.*

Suivant les dimensions superficielles des clôtures qu'on veut établir, l'espèce d'isolement qu'on veut avoir, la nature des matériaux à employer; l'épaisseur varie depuis celle de 2 pouces ( 0m,05 )( épaisseur d'une brique de champ ), jusques à celle de 6 à 7 pieds ( 2m,05 à 2m,37 ), épaisseur des murailles antiques et de celles du moyen âge.

La difficulté d'exécuter avec précision de grandes parois minces en briques de champ, et même de plat dans le sens de la longueur ; la nécessité d'employer le plâtre ou les plâtres-ciments, pour obtenir un prompt

durcissement, limitent ce genre de séparation à des surfaces de 20 à 25 mèt. carrés. Des clôtures en briques ayant pour épaisseur la longueur des briques ordinaires, peuvent être exécutées en mortier ordinaire sur des surfaces doubles des précédentes.

Si l'on forme l'épaisseur des murs de séparation d'une longueur et d'une largeur, ou de deux longueurs de briques ordinaires, on aura des cloisons très-solides, et qui se prêteraient à des longueurs indéfinies et à des hauteurs comprises entre 5 et 7 mètres.

Rondelet conseille en général de prendre pour épaisseur moyenne le 16e de la hauteur. L'on peut suivre la même règle pour les murs :

En maçonnerie de pierres de taille, avec ou sans mortier.

De moellons piqués ou essemillés, avec mortier.

Enfin, pour les maçonneries en béton.

Quant aux maçonneries en moellon ordinaire et mortier, leur épaisseur est déterminée généralement d'après les dimensions des fragments de pierres que les carrières fournissent. Ainsi, dans beaucoup de cas, il est plus économique de faire des murs de clôture et de séparation de 50 cent. d'épaisseur que de 40 cent., parce que le déchet dans l'ébauche du moellon compenserait et au delà le surcroît d'épaisseur.

Si les maçonneries en moellon ordinaire étaient en pierres sèches ou avec argile simple sans chaux; comme la bonté de la construction n'aurait d'autres garanties que l'entrelacement et l'assiette plus ou moins soignés des matériaux, il conviendrait, pour les hauteurs au delà de 3 à 4 mètres, de prendre pour épaisseur moyenne le 6e de la hauteur.

Toutes les fois que cela sera possible, il sera préférable, au lieu d'exécuter les murs sur la même épaisseur depuis le sol jusqu'à la crête, de réduire cette épaisseur au sommet à un minimum de 20 à 30 centim., et d'élever les parements en talus ou par retraites. L'épaisseur de la base serait donnée par $x = \frac{2h}{r} - 20^c$ (ou $30^c$) : $h$ étant la hauteur, et $r$ la fraction de la hauteur qui correspond à l'épaisseur moyenne.

Dans beaucoup de circonstances on pourrait se dispenser des épaisseurs indiquées ci-dessus, en établissant de distance en distance, 1° soit des *chaînes* verticales ou horizontales en pierre de taille, qui encadreraient les maçonneries ordinaires en moellons, et serviraient ainsi de repères pour la régularité du travail; 2° soit des *contre-forts* ou surépaisseurs en maçonnerie de moellon, dont la section horizontale serait rectangulaire

Figures 41 des planches.

ou demi-circulaire, ou de toute autre forme. Dans les maisons d'habitation, les murs de face et de refend se servent ainsi naturellement de *contre-forts*; et l'on peut par cette disposition restreindre l'épaisseur de ceux de ces murs qui ne forment que séparation.

Les matériaux les moins résistants des constructions *ordinaires* supportent des charges bien inférieures à celles qu'on a assignées dans la Ire leçon.

Mais dans les établissements et monuments publics d'une grande hauteur, il faut se rendre compte des charges et des résistances dans les hypothèses les plus défavorables; réserver pour les parties inférieures les matériaux les plus volumineux, les plus forts et les moins altérables par les vicissitudes atmosphériques et le temps. Ce sont des précautions à observer, surtout pour les maçonneries en pierres sèches d'une grande hauteur, où, par imparfaite exécution, des moellons souvent ne sont encastrés qu'à une de leurs extrémités, et sont en porte-à-faux sur une partie de leur longueur. Cette recommandation s'applique du reste aussi à toutes les maçonneries dont il est fait mention ci-dessous.

*Maçonneries considérées comme supports.*

Pour connaître les dimensions au minimum des maçonneries agissant comme supports, il faut se rendre compte, non-seulement de la charge totale maximum, mais de celle qui correspond à chaque zône, pilastre, pilier ou colonne, et de sa direction relativement à la base des maçonneries. On sait, en effet, que, pour l'équilibre statique, la résultante de tous les efforts doit traverser l'enceinte circonscrite par la base *supposée résistante*. Dans beaucoup de circonstances cette résultante passerait trop près des arêtes, et en déterminerait l'écrasement, si l'on n'avait soin de donner aux fondations un empattement plus ou moins considérable autour de la base.

La forme d'égale résistance des solides isolés, chargés debout suivant leur axe, se compose théoriquement de deux fuseaux presque coniques, ayant base commune au milieu de la hauteur, et leurs sommets au haut et au bas du solide. (Voir le *Résumé des leçons données par M. Navier, à l'Ecole des ponts et chaussées*, 4e section, article 2.)

Mais comme la charge, permanente ou temporaire, peut très-bien n'être pas suivant l'axe; que les matériaux ne sont pas homogènes entre eux, ni même dans leur composition individuelle, l'on se borne; dans la pratique

pour les colonnes isolées, à les renfler légèrement vers le milieu de leur hauteur.

Si dans une maçonnerie continue, la charge sur une zône en particulier, était assez grande pour faire craindre une déliaison entre elle et ses deux voisines, il faudrait comparer à cette charge la résistance d'adhérence qu'on a réglée à $0^{kil}$,37 pour les maçonneries en mortier, et en déduire l'épaisseur à donner aux surfaces de liaison.

Rondelet, dans l'*Art de bâtir*, a donné des formules empiriques pour la fixation des épaisseurs des murs de face et de refend des édifices publics et privés.

Dans la plupart des constructions ordinaires, où les refends sont nombreux, où souvent les poutres des planchers rendent solidaires des murs parallèles, l'on se borne, pour l'épaisseur des murs, aux moyennes qu'on a indiquées pour les *murs de simple séparation*, et l'on fait même décroître les épaisseurs dans le sens de la hauteur.

Mais s'il s'agissait de grands espaces *libres*, où les murs auraient de fortes charges à supporter; on pourrait calculer séparément le poids de ces murs, considérés comme murs de séparations, et forcer les dimensions qu'ils auraient eues dans cette hypothèse, dans le rapport de ce poids à la charge totale.

*Maçonneries à plat, servant de séparations horizontales.*

Si ces maçonneries couvrent un vide au-dessous d'elles, on calculera les épaisseurs correspondantes aux charges à supporter, d'après les formules assignées pour les pierres de taille ; mais en prenant pour coefficient de résistance, non celui des moellons ou pierres, mais celui de 1 kilog. par centim. carré des mortiers de liaison. On s'assurera d'ailleurs que la dimension d'épaisseur ainsi obtenue, donnera aussi une résistance d'adhérence suffisante à raison de $0^{kil.}$,37 par centimètre carré.

Si les maçonneries reposent sur un sol incompressible, mais sont soumises à des charges variables et inégalement réparties, il faudra, dans l'hypothèse la plus défavorable, comparer la charge spéciale d'une zône avec l'adhérence de cette zône pour ses voisines (toujours calculée à raison de $0^{kil.}$,37 par centimètre carré), en observant que les charges croissent comme les carrés des côtés homologues, et les adhérences seulement comme ces côtés.

Si les maçonneries à plat, ou de fondation, portaient sur un sol inégalement résistant, il faudrait encore considérer les points les plus résistants comme fixes, et comparer avec les charges intercalaires, la résistance à l'action transversale et celle d'adhérence des maçonneries ; ces dernières seraient alors comme appuyées sur ces points fixes. Faute de ces calculs préliminaires, il est arrivé quelquefois que des maçonneries de radiers, d'aires, etc., se sont séparées de celles qui étaient engagées sous des murs riverains, et se sont lézardées en s'enfonçant ou en se soulevant, surtout par suite de communications souterraines avec des sources ou des retenues d'eau élevées.

*Maçonneries résistant à des poussées latérales d'eau, de terres et autres que celles des voûtes.*

Les terres, et surtout les argiles mouillées et puis gelées, ayant une grande expansion et quelquefois une mobilité équivalente à celle de l'eau, avec une densité beaucoup plus grande et presque double, l'on a calculé généralement l'épaisseur des maçonneries qui leur étaient opposées, comme s'il s'agissait d'un liquide d'une densité double de celle de l'eau, et qui de plus serait chargé à sa surface d'un poids équivalant à ceux qui peseraient sur les terres au-dessus de la crête des maçonneries. Si les eaux qui peuvent s'infiltrer derrière les maçonneries proviennent, sans *discontinuité* dans leur cours, de sources placées plus haut, il est indispensable de tenir compte de cet excédant de pression statique dans l'évaluation des charges; car il produirait l'effet de *presse hydraulique*.

Il faut établir au reste l'équilibre statique, quelle que soit l'espèce de poussée latérale :

1° Sous le rapport du *glissement* des maçonneries sur leurs fondations, entre la résultante de toutes les charges, et le frottement de ces maçonneries sur la base des fondations, en *ne tenant pas compte de leur adhérence*. Ce frottement a été estimé tantôt aux $\frac{4}{5}$, aux $\frac{3}{4}$, tantôt à la $\frac{1}{2}$ et même au $\frac{1}{3}$ de la portion du poids des maçonneries qui était normale à cette base.

2° Sous le rapport du *pirouettement* autour de l'arête extérieure des maçonneries, entre le moment statique de la résultante des charges par rapport à cette arête, et le moment du poids des maçonneries par rapport à cette même arête, *en faisant encore abstraction de l'adhérence*.

3° Sous le rapport de la déliaison dans le sens longitudinal, et *pour les zônes des murs qui peuvent être considérées comme fixes à leurs extrémités*; il faudra comparer les charges sur chaque zône, d'abord avec la résistance d'adhérence de cette zône à ses voisines, puis avec sa résistance à l'action transversale, en l'envisageant comme encastrée à ses extrémités et chargée sur sa longueur comme un seul bloc.

On a remarqué en effet, dans la plupart des maçonneries de soutènement qui éprouvaient des mouvements; que d'abord elles *pliaient* en quelque sorte sous l'effort comme des pièces de bois, et affectaient la forme d'arcs de chainette dans la longueur de leurs diverses sections horizontales. Aussi le principal objet des contre-forts intérieurs ou extérieurs est de fractionner les longueurs de soutènement, de s'opposer aux effets de *flexion* plus efficacement que ne le ferait une surépaisseur uniforme donnée au mur et qui serait d'un cube égal à celui des contre-forts. Figures 42 des planches

On prendra pour épaisseur moyenne du mur la plus grande de celles qu'on déduira des calculs qu'on vient d'indiquer, sauf à la forcer au moins de moitié en sus, et même du double pour les maçonneries en pierres sèches.

Quant aux variations d'épaisseur depuis la base jusqu'au sommet des maçonneries, on pourrait les calculer comme il vient d'être dit, et en faisant diverses hypothèses sur les bases de fracture. Mais il y aurait à tenir compte alors de l'adhérence des maçonneries suivant la base de fracture, tant pour le glissement que pour le pirouettement, toujours à raison de $0^{kil.},37$ par centimètre carré. M. Navier a indiqué, au paragraphe 220 de l'ouvrage déjà cité, la forme d'un massif d'égale résistance à la rupture par renversement.

M. de Prony est le premier qui, d'après les indications de Coulomb, ait donné la solution complète de la poussée des terres, en y faisant entrer la cohésion et le frottement, et appliquant la méthode des *maxima* et des *minima*. M. de Prony a joint à la solution numérique du problème un tableau graphique par lequel on trouve sans calcul et par le compas, les épaisseurs *relatives* à donner à des maçonneries de soutènement dans les diverses hypothèses qui peuvent se présenter. M. de Prony ayant autorisé qu'on annexât au présent ouvrage, et le tableau et l'explication qui s'y rapporte, on les trouvera à la fin du texte.

M. le *Français* a publié dans le *Mémorial du génie militaire*, une théorie complète de la résistance des maçonneries à la poussée des terres, en in-

troduisant un coefficient de résistance, dont le but est de donner aux maçonneries une surépaisseur relativement à l'épaisseur théorique, équivalente à celle que Vauban avait donnée dans les revêtements des places fortes construites par lui.

Enfin, M. Navier, dans l'ouvrage déjà cité, a traité de nouveau toutes les questions relatives à la résistance des maçonneries à des poussées transversales.

On renvoie à ces divers auteurs pour approfondir cet important objet d'études.

Dans la pratique et les cas ordinaires, on donne aux murs de soutènement d'eau, une épaisseur moyenne égale à la moitié de la hauteur d'eau correspondante à la charge totale; et aux murs en maçonnerie de mortier soutenant les terres, une épaisseur moyenne égale au tiers de la hauteur, non du mur, mais *des terres*, y *compris leurs surcharges.* Suivant les convenances particulières de chaque localité et les surcharges, on fixe de $0^m,50$ à $1^m,20$ l'épaisseur à la crête du mur, et l'on en déduit celle de la base par l'équation $x = \frac{2h}{r} - A$; $h$ étant la hauteur *des terres*, $r$ la fraction de la hauteur des terres correspondante à l'épaisseur moyenne, et A l'épaisseur à la crête; puis, par des retraites intérieures, échelonnées par assises, on raccorde les dimensions extrêmes d'épaisseur.

Pour les maçonneries de soutènement en pierres sèches, l'épaisseur moyenne est d'ordinaire au moins les $\frac{2}{3}$ de la hauteur des terres. Ce genre de maçonneries a, au reste, l'avantage d'ouvrir des débouchés aux eaux des filtrations, et de se prêter au gonflement des terres humides. Aussi, dans les maçonneries en mortier, pour soutènement des terres, il est essentiel de réserver de nombreux créneaux équidistants et à divers étages, qui ont de plus l'avantage de hâter la dessiccation des mortiers.

On trouvera à la fin de la 12$^e$ leçon des données pour calculer les dimensions des maçonneries exposées au tir des bombes et boulets.

Figures 43 des planches.

Pour donner de la solidité aux diverses couches de maçonnerie contre les efforts qui tendraient à les faire glisser les unes sur les autres; les lits des assises ne doivent pas être parallèles, autant que possible, à la direction de la résultante des poussées; et les matériaux doivent *s'entrelacer* dans le sens perpendiculaire à cette direction.

Moyens de diminuer l'épaisseur des murs de soutènement en maçonnerie.

On a imaginé divers moyens de diminuer l'épaisseur des soutènements de terres en maçonneries de mortier. On peut voir, dans le *Traité de con-*

*struction des ponts*, de Gauthey (page 31), que cet Ingénieur avait obtenu une économie notable en réduisant l'épaisseur d'un quai en maçonnerie à $1^m,20$, et en le munissant, du côté des terres, de contre-forts équidistants, Figures 44 des planches. réunis l'un à l'autre longitudinalement par plusieurs étages de petites voûtes en maçonnerie de moellons, dont les vides étaient remplis en terres. On a employé une disposition qui a quelque analogie avec la précédente en Angleterre, à l'arsenal de Shéerness, pour des quais fondés sur de la vase molle.

On arriverait au même résultat d'économie; en adossant à l'intérieur des maçonneries de mortier, d'autres maçonneries en pierres sèches d'un volume aussi grand que possible, ou même de simples amas de pierrailles anguleuses. Le damage progressif des remblais, l'emploi pour ces remblais d'argile ou de sable mélangé de $\frac{1}{10}$ à $\frac{1}{12}$ de son volume de chaux éteinte, ont été également recommandés. Enfin, des clayonnages, des fascinages de soutènement ou des pans de bois avec piquets, pourraient être également établis à l'intérieur des soutènements pour concourir à arrêter la poussée des terres, ou pour la prévenir.

Cette dernière précaution est utile pour les *pérés* ou revêtissages en maçonneries de pierres sèches ou de mortier, suivant des talus plus ou moins inclinés; sur tout quand ces pérés sont tantôt immergés dans l'eau, tantôt émergés.

En effet, la terre, gonflée en arrière, tend à les pousser du dedans vers le dehors. Cette terre, desséchée ensuite lors de l'émersion, prend du retrait et laisse du vide entre elle et l'intrados du péré. Figures 45 des planches.

On trouvera beaucoup de détails sur les pérés, dans un article fort intéressant, inséré par M. l'Ingénieur en chef Vallée, dans les *Annales des ponts et chaussées* de 1833, sous le titre : *Réservoirs d'alimentation des canaux*. Cet Ingénieur propose, pour diminuer les avaries et surtout en borner le champ, et rendre à la fois les réparations plus faciles, d'exécuter les pérés par gradins et compartiments indépendants. Figures 46 des planches.

Les pérés, et généralement tous les revêtements inclinés exposés à l'air, ont au reste l'inconvénient de se prêter au développement de la végétation dans les lits et joints ; et cette cause de destruction est si active, si difficile à arrêter, qu'elle compense souvent l'avantage qu'offrent les talus extérieurs des soutènements, sous le rapport de la résistance aux poussées latérales.

*Résistance des maçonneries des voûtes, et de celles de leurs piédroits.*

Avant d'examiner les conditions de résistance des maçonneries des voûtes,

il est nécessaire de décrire les formes géométriques des voûtes habituellement employées dans les constructions, et leur composition élémentaire.

Dans l'antiquité la plus reculée, on couvrait les vides des maçonneries par des *monolithes* de dimensions suffisantes pour se porter eux-mêmes avec la charge qui leur était superposée ; ou bien deux de ces pierres venaient s'arc-bouter au milieu du vide, sous un angle plus ou moins ouvert.

Figures 47 des planches

On plaçait aussi quelquefois, de chaque côté du vide, des pierres étagées par gradins en surplomb, dont les longueurs étaient de plus en plus grandes, à mesure que leurs saillies sur le vide des piédroits augmentaient; ces deux espèces d'*escaliers renversés* étaient réunies dans le haut de l'ouverture par une pierre unique formant la couverture.

On se sert encore de ces moyens pour des ouvertures de 2 mètres; seulement on a soin, pour soulager les pierres soumises ainsi à une action transversale, de jeter au-dessus d'elles de petites voûtes plates en briques ou moellons, qui reportent la charge sur les piédroits latéraux.

Plates-bandes.

Quand le vide à couvrir est de 2 mètres et au delà, et que par des sujétions spéciales, on ne peut pas établir de voûtes, on a recours aux *plates-bandes*; c'est-à-dire qu'on forme comme un bloc unique par la juxtaposition de plusieurs blocs taillés en coins qui se pressent l'un contre l'autre. Ordinairement les prolongements visuels des plans de contact, des blocs viennent se couper suivant l'arête inférieure d'un prisme triangulaire équilatéral qui serait construit sur la face inférieure de la plate-bande.

La poussée croissant avec les carrés des ouvertures; les tassements presque inévitables des plates-bandes de plus de 3 mètres de portée, ne peuvent être prévenus qu'en jetant au-dessus d'elles les petites voûtes

Figures 48 des planches.

plates en briques ou en moellons déjà mentionnées, et en employant des liaisons en fonte ou fer forgé, qui empêchent les écartements des voussoirs extrêmes. D'ailleurs les angles aigus, que déterminent les intersections des plans des joints avec les surfaces supérieures et inférieures des plates-bandes, y occasionnent souvent des éclats. De là l'emploi des voûtes de diverses formes.

### *Des voûtes.*

Définition de leurs diverses formes et éléments

On appelle *surface de douelle* ou *intrados*, la partie apparente d'une voûte du côté du vide qu'elle couvre ; *arêtes* ou *lignes* de douelle, les lignes de cette surface, par lesquelles passent les plans de contact des *grands joints* longitudinaux des zônes élémentaires de la voûte ; ces zônes s'appel-

lent elles-mêmes *rangées* ou *lignes* de *voussoirs*, ou *claveaux*; dans chaque ligne ou rangée, les aboutissements des voussoirs ou claveaux entre eux s'appellent *petits-joints*; enfin *l'extrados* est la surface régulière ou irrégulière à laquelle les voussoirs s'arrêtent. Les *piédroits* ou *jambages* dans les constructions civiles, les *piles* ou *culées* dans les ponts, sont les supports de rive de chaque voûte; les *coussinets* sont les blocs extrêmes de ces supports, contre lesquels s'appuient les premiers voussoirs à la naissance de la voûte; la *clef* est le bloc presque toujours unique, situé au sommet de la voûte; les *contre-clefs* sont les claveaux qui l'avoisinent de chaque côté. Figures 49 des planches.

Quand les lignes génératrices d'une voûte sont perpendiculaires à la *surface de tête* de la voûte, celle-ci est dite *droite*; dans le cas contraire, elle est dite *biaise*; quand ces lignes sont inclinées à l'horizon, la voûte est dite *en descente*. La voûte est *cylindrique* quand ces même lignes sont parallèles entre elles; *conique* quand elles concourent a un même point; *conoïde* quand elles sont horizontales sans être parallèles; à *surface gauche développable* quand ces lignes ne sont pas deux à deux dans le même plan. Figures 50 des planches.

Si l'axe de la voûte était *curviligne*, il y aurait les mêmes espèces de voûtes qu'avec l'axe rectiligne. L'un des cas les plus simples est celui des surfaces de révolution, où cet axe est une circonférence de cercle.

Les voûtes peuvent se croiser, se pénétrer suivant une foule de combinaisons dont les plus simples sont les pénétrations de deux voûtes cylindriques à angle droit : quand elles ont même montée, elles prennent le nom de *voûtes d'arête*. Figures 51 des planches

Les sections normales aux axes des voûtes cylindriques et coniques sont ordinairement dans les constructions, le demi-cercle, l'arc de cercle, l'ellipse ou l'*anse de panier*, l'*ogive*, formée de deux arcs de cercle de même rayon, qui se coupent sur la ligne milieu entre les supports de la voûte.

On a proposé d'y substituer dans certains cas la courbe de la *chaînette*, et quelques autres provenant de divers modes de génération (voir la collection lithographique de l'École des ponts et chaussées et les *Annales des Ponts et chaussées*).

Dans les constructions du moyen âge, dans celles de l'Asie, les courbes dont on vient de parler sont combinées d'une foule de manières différentes dans la formation des voûtes.

L'*anse de panier* n'est qu'une ellipse formée par plusieurs arcs de cercle tangents entre eux, et rendue ainsi plus facile pour le tracé en grand.

Pour que l'anse de panier soit tangente à ses piédroits, il faut que les Tracé de l'anse de panier.

arcs qui la composent mesurent en somme 180 deg., et que les petits arcs aient leur centre sur le diamètre de la courbe.

Toute anse de panier a un nombre impair de centres.

Cette courbe n'en a ordinairement que trois, lorsqu'elle n'est pas très-surbaissée.

L'ouverture et la montée étant données, l'analyse indique les moyens de trouver les centres.

La solution la plus élégante est celle que Bossut a publié; mais comme ce problème est de la classe de ceux qu'on appelle indéterminés, l'équation du second degré qui en résulte ne donne l'un des rayons que lorsque l'autre est déterminé.

Figures 52 des planches.

Pour faire cesser l'indétermination, M. Bossut a remarqué que la forme d'anse de panier la plus agréable est celle où la courbure des arcs AM et MD est la moins inégale.

Ainsi il faut que le rapport géométrique de la différence des deux rayons $x$ et $y$ soit un minimum, c'est-à-dire $d\frac{x+y}{x}=0$.

En effectuant les calculs nécessaires pour la solution de la question d'après cette considération, on parvient à un résultat fort simple, qui donne la construction géométrique suivante, de l'anse de panier à trois centres.

Figures 53 des planches

Les centres se trouvent placés aux intersections P et $\pi$, du grand axe, et du petit axe prolongé, par une droite M$\pi$, perpendiculaire à A D, qui joint les extrémités des demi-axes, et qui divise en deux parties égales les portions de la ligne AD, dont on a soustrait D$d'$, égal à la différence des deux demi-axes.

Cette méthode de construction est fort ancienne; c'est la plus usitée dans la pratique. Les appareilleurs l'emploient ordinairement.

On peut encore faire disparaître l'indétermination du problème du tracé d'une anse de panier, par la condition que chacun des trois arcs soit de 60 degrés.

Figures 54 des planches.

Après avoir tracé un demi-cercle BC comme rayon; par le point D, où le demi-cercle rencontre la montée prolongée, prenez la corde M'D', capable d'un angle de 30°; menez ensuite la corde M'C', qui contiendra un angle de 60°; par l'extrémité de la montée D menez DM parallèle à D'M', et par M tirez MO parallèle à M'B; les points d'intersection K et O seront les centres, et l'anse de panier qui résultera de ce tracé aura les conditions exigées.

Cette construction de l'anse de panier est souvent adoptée par les Ingénieurs des ponts et chaussées, lorsqu'il y a peu de différence entre la

demi-ouverture et la montée. Mais lorsque la voûte est surbaissée au-dessous du tiers, on est obligé d'y renoncer, à cause de la trop grande courbure du petit axe, qui produit à la vue un effet désagréable.

Dans ce dernier cas, où il faut plus de trois arcs pour le tracé de l'anse de panier, on emploie cinq centres, quelquefois sept, et même onze pour le plus grandes arches.

Les belles courbes des arches du pont de Neuilly, qui ont 120 pieds ($38^m$,98) d'ouverture, ont été tracées à onze centres. Figures 55 des planches.

Les conditions dont on s'est servi dans le tracé de ces courbes, pour faire cesser l'indétermination du problème, sont : 1° que la distance *i*, 12, entre le milieu de l'ouverture et le centre de l'arc extrême, soit coupée par les rayons de ces arcs, en parties qui soient entre elles suivant le rapport arithmétique des nombres naturels 1, 2, 3, 4 et 5.

2° Que le prolongement de ces rayons mesure sur la montée des espaces égaux entre eux.

3° Que *i*, 12 soit égal au tiers de *i*B.

Il restait encore à déterminer le lieu 12 du centre de l'arc extrême, afin que la courbe décrite avec les autres données de position passât par les extrémités de la montée et de l'ouverture.

Pour déterminer le lieu de ce centre 12, en se conformant à toutes ces données, on s'est servi d'un moyen aussi simple qu'ingénieux.

On a construit à part une figure V, *i*, 12, R′, Q, P′, O′, V, représentant la position des centres, d'après les données. Par des analogies très-simples entre les côtés de ces figures semblables, on en conclut facilement la valeur analytique de $x$, et l'on trouve $x=(b-a)\frac{n}{m+n-S}$ S′ étant le polygone 12, R, Q, P, etc. ; et $m$ et $n$ étant le rapport entre *i*, 12 et *i*V. Figures 56 des planches.

Pour avoir complétement la valeur de $x$, il reste à calculer l'expression du polygone S : on l'obtient par les sinus des triangles successifs, dans lesquels on reconnait tout ce dont on a besoin. Ce calcul est très-long; on peut l'abréger par une construction graphique sur une grande échelle.

On aurait pu prendre un autre rapport entre $m$ et $n$, qui, dans ce cas, est de 1 à 3 ; mais toute modification qui augmenterait ce rapport tendrait aussi à augmenter le grand rayon du milieu de la voûte, et par conséquent à diminuer la courbure et la solidité.

MM. les Ingénieurs K'maingant et Montluisant, dans des notices qui font partie de la deuxième collection lithographique de l'École des ponts et

chaussée, ont indiqué des modes de tracé pour les anses de panier, en supposant que les arcs et les rayons variassent suivant une progression géométrique. Un article de M. l'Ingénieur Michal, sur les arches du pont du Sault à Lyon, inséré dans les *Annales des ponts et chaussées* de 1831, donne une méthode encore plus générale; enfin M. de Prony a publié en 1834, dans ces mêmes *Annales*, des formules et procédés très-simples pour toutes les courbes du second dégre.

L'illustre Monge a prouvé le premier que pour la solidité des voûtes, il fallait que les lignes de *douelle des grands et petits joints*, appartinssent à deux systèmes de courbes tracées à la surface de la voûte; les unes de plus grande courbure, les autres de plus petite courbure; et que ces joints fussent normaux à la même surface de la voûte et formés de surfaces développables ou *réglées*, suivant l'expression des ouvriers. Il a ramené ainsi le tracé des voûtes, et l'art du trait à être une scholie de la géométrie descriptive. On renvoye aux traités de *coupe de pierres* pour les développements.

Dans les voûtes cylindriques ou coniques, les lits et les joints des voussoirs sont des plans normaux à la douelle de la voûte; dans les voûtes à surface de révolution, les lits sont des surfaces coniques, et les petits joints sont des plans passant par l'axe de révolution.

Après ces détails préliminaires, on va aborder les questions des la résistance des voûtes et de celle de leurs piédroits.

---

## RÉSUMÉ DE LA DOUZIÈME LEÇON.

RÉSISTANCE DES VOUTES DE DIVERSES FORMES ET DE LEURS PIÉDROITS.—APPAREIL ET CONSTRUCTION DES VOUTES.—CINTREMENT ET DÉCINTREMENT. — PÉNÉTRATIONS DES PROJECTILES DE GUERRE DANS LES MASSIFS DES DIVERS OUVRAGES. — VOUTES A L'ÉPREUVE DES BOMBES. — OBSERVATIONS ESSENTIELLES RELATIVES A LA MISE EN SERVICE DES MAÇONNERIES.

---

### *Résistance des voûtes et de leurs piédroits.*

La solution de cette question est une des recherches le plus délicates des sciences physico-mathématiques, parce qu'elle dépend de la nature des matériaux, du système de construction et de l'âge des maçonneries au moment où elles sont abandonnées à elles-mêmes.

Voûtes en plein cintre, en anse de panier, en arc de cercle.

Lahire et d'autres géomètres supposaient que les voûtes en plein cintre se rompaient de chaque côté du sommet au milieu de la demi-voûte, c'est-à-dire à 45° au-dessus du coussinet ; et que pour les arches surbaissées en anse de panier, où la flèche était le tiers de la corde, les points de rupture étaient à la rencontre de la courbe avec deux rayons formant chacun un angle de 30° avec la verticale, et appartenant à la partie supérieure de la courbe assimilée à un arc de cercle. Ces deux dernières hypothèses ont à peu près été confirmées par les expériences en grand de Peyronnet, lors du décintrement des ponts de Nogent et de Neuilly.

Figures 57 des planches.

On a supposé ensuite que la partie supérieure de la voûte, comprise entre les deux points de rupture, agissait sous l'action des charges qu'elle supportait, comme un coin ; et tendait à renverser les deux parties inférieures de chaque côté, et avec elles les piédroits ou culées s'il y en avait, et qu'ils fissent corps avec elles. On a considéré les masses agissantes et résistantes comme formées d'un seul bloc, et sans tenir compte du frottement et de l'adhésion des mortiers dans les joints de rupture. Une formule d'équilibre des moments de ces masses, tant sous le rapport du glissement que du pirouettement conduisait à une équation d'une solution assez facile, et qui donnait une relation entre les épaisseurs de la voûte à la clef et à l'origine, et s'il y avait des piédroits, entre leur épaisseur et celle de la voûte à la clef.

Feu Chezy, Inspecteur général des ponts et chaussées, avait calculé des tables d'après ces bases, et elles ont servi avec succès pour déterminer les dimensions de plusieurs grands ponts. Elles se trouvent à la suite de cet ouvrage, exprimées en anciennes et nouvelles mesures.

Pour déterminer l'épaisseur à la clef, qui était une donnée dans les formules ci-dessus, on se servait dans les ponts et chaussées de la formule empirique $e = (\frac{1}{24} - \frac{1}{144})c + 0^m,32$ ; $c$ étant l'ouverture de la voûte.

Gauthey, dans son *Traité de la construction des ponts*, donne les rapports suivants, tirés de la construction de plusieurs grands ponts :

| INDICATION DES PONTS. | RAPPORT de la flèche | RAPPORT de l'épaisseur à la clef, |
|---|---|---|
| | avec la corde de l'arc compris entre les points de rupture. | |
| Pont de Nemours sur le *Loing* | 0,055. | 0,080 |
| Pont de Saint-Maxence | 0,083. | 0,062 |
| Pont de Neuilly | 0,131. | 0,048 |
| Pont de marbre à Florence | 0,215. | 0,038 |
| Pont de la Vieille-Brioude | 0,307. | 0,031 |

Gauthey ajoute qu'en se donnant pour une voûte projetée, un nombre intermédiaire à ceux de la première colonne, on déterminerait par des moyennes le nombre correspondant de la deuxième; mais cette règle, qui ne serait applicable qu'aux voûtes en pierres de taille, et pour les grands ponts, est vicieuse, en ce qu'à proportion égale les pressions varient comme les cubes, quand les résistances ne varient que comme les carrés.

Les expériences en petit de Danisy, et postérieurement celles plus en grand de feu M. Boistard, Ingénieur en chef des ponts et chaussées, où les effets ont été observés avec soin et sagacité, ont prouvé : que la partie supérieure, au lieu de glisser d'une seule pièce sur les deux joints de rupture, à droite et à gauche de la clef, se divisait près de la clef en deux parties par un premier joint de rupture; et que ces parties aboutissaient à deux autres points de rupture intermédiaires entre la clef et les naissances, non plus invariables, mais d'une position variable. Cette position changeait suivant que, par la forme des voûtes ou par l'effet des surcharges, l'action des parties supérieures prédominait plus ou moins sur celle des parties inférieures, et *vice versâ*. Les mêmes expériences ont prouvé que ces grouppes de voussoirs, fonctionnant ainsi comme un seul bloc, tournaient comme des leviers autour des points d'articulation, en même temps qu'ils tendaient à faire glisser sur leurs fondations, soit les naissances des voûtes, soit leurs piédroits.

Les points d'articulation, dans le cas de prédominance des parties supérieures sont : près de la clef à l'*extrados*; à l'intrados aux joints de rupture des reins; et à l'extrados aux naissances de la voûte ou à la base des piédroits. Lorsque, au contraire, comme cela peut arriver dans les voûtes *ogives*, les parties inférieures des voûtes prédominent, les points d'articu-

Figures 58 des planches

lation sont : à l'*intrados*, près de la clef et aux naissances des voûtes ou base des piédroits; et à l'*extrados* aux joints de rupture des reins.

Dans les pleins cintres et les anses de paniers à trois centres, les points de rupture des reins paraissent être pour les premiers vers l'angle de 27° en partant des naissances, et dans les seconds vers l'angle de 45° du petit arc de la naissance. Dans les voûtes en arc de cercle surbaissées le point de rupture est à la naissance. Figures 58 des planches.

Coulomb, d'après les expériences de Danisy, avait établi la théorie des voûtes sous le double rapport du glissement et du mouvement de rotation. Elle a été traitée depuis sur les mêmes bases par M. Boistard dans un ouvrage spécial, par Gauthey dans son *Traité sur la construction des ponts*; par MM. Audoy, officier supérieur du génie; Garidel et Petit officiers du même corps; par M. Poncelet dans le *Mémorial du génie*; par M. Navier dans l'ouvrage déjà cité (*Résumé des leçons données à l'école des ponts et chaussées*); enfin par MM. Lamé et Clapeyron dans les *Annales des mines* de 1823, et dans le *Journal du génie civil*. Ces divers auteurs ont indiqué, pour la recherche des points de rupture des reins, et des dimensions des voûtes, à défaut de solution numérique des formules analytiques, des procédés de tâtonnement, ou des moyens graphiques, fondés sur des considérations de maxima et de minima des efforts opposés.

Mais les résultats auxquels on arriverait ne correspondraient qu'à un équilibre théorique, tout au plus réalisable pour des charges permanentes, par des matériaux homogènes, inaltérables, d'une grande dureté, taillés et posés avec une précision sinon impraticable au moins bien plus dispendieuse qu'un excédant même notable dans les dimensions d'épaisseur des voûtes.

On doit faire dans l'application de ces formules nouvelles ce que M. *Lefrançais* a fait pour les soutènements de terre, c'est-à-dire les rendre comparables, à l'aide d'un coefficient en *quelque sorte technique*, soit avec les constructions déjà exécutées, soit avec les tables de Chezy, pour ceux des chiffres de ces tables qui ont été suivis dans l'exécution. On obtiendra ainsi le même surcroît de stabilité pour les diverses espèce de voûtes; ce que ne donnent pas ces mêmes tables calculées sur les formules anciennes de Lahire.

Dans la composition des diverses voûtes, il importe au reste de bien se rendre compte quels sont les effets qui sont proportionnels aux carrés de certaines dimensions, ou à leurs cubes; et de rechercher si, dans

certains cas, comme dans les voûtes ogives, les clefs ne tendraient pas à remonter.

Voûtes diverses. Dans les voûtes à *tête biaise*, il y a un excédant de poussée sur l'un des piédroits qui résulte de l'obliquité de la tête sur l'axe, et qu'il faudra compenser par un surcroît d'épaisseur au moins partiel.

Pour les voûtes en *descente*, dont les naissances et lignes de *voussoirs* sont inclinées à l'horizon, il y aura à rechercher si le frottement dû à la composante normale des charges supérieures, joint à l'adhérence des mortiers, contre-balance l'effort de la composante parallèle aux plans des lits.

Dans les voûtes à *surface conique*, le rapport de l'ouverture à la montée de la voûte étant le même dans toute la longueur de cette dernière, on pourra régler les dimensions de la voûte et de ses piédroits à chaque tête, et les raccorder ensuite d'une tête à l'autre par des lignes droites.

On peut agir de la même manière, sans erreur grave, pour les surfaces *gauches*, telles qu'elles se présentent dans les constructions.

Pour les voûtes à *surface de révolution*, on considérera pour l'équilibre deux sections opposées faites par des plans passant par l'axe. Car on arriverait à des dimensions trop fortes, en effectuant les calculs pour des sections faites par des plans parallèles équidistants de l'axe de révolution. M. Navier, dans l'ouvrage déjà cité, fait remarquer : que pour l'équilibre des voûtes en berceau, chaque tranche doit être en équilibre par elle-même et indépendamment des liaisons d'une tranche à l'autre; tandis que dans les voûtes à surface de révolution, une tranche ne peut glisser ou être renversée sans que la voûte tout entière ne cède. Ces mêmes voûtes à surface de révolution, peuvent être coupées suivant un plan horizontal qui retrancherait leur partie supérieure, sans que l'équilibre primitif cesse de subsister.

Contre-forts des voûtes et de leurs piédroits. — Figures 59 des planches. On augmente la résistance des voûtes et de leurs piédroits, 1° en élevant des charges de maçonneries ou autres à l'aplomb des naissances ou piédroits, ainsi que les constructions gothiques en fournissent de nombreux exemples; 2° en renforçant de distance en distance l'extrados des naissances ou des piédroits par des contre-forts pleins, ou en arcs, à l'instar de ces mêmes constructions gothiques; mais il faudra régler l'intervalle de ces appuis, de manière que les maçonneries intercalaires ne puissent se détacher des zônes appuyées par les contre-forts, ni rompre d'un contre-fort à l'autre.

Il est évident, d'ailleurs, que si, en arrière des piédroits d'une voûte, il y avait en sens contraire de la poussée des voûtes, une poussée *permanente*, due à l'action de l'eau ou des terres, on pourrait en profiter pour réduire l'épaisseur des piédroits. Toutefois, si les points d'application des résultantes opposées n'étaient pas à peu près à l'opposite l'un de l'autre, il y aurait à examiner si le piédroit par sa masse pourrait résister à l'effort de ce *couple statique*.

La poussée des voûtes, en berceau, cylindriques, coniques, en surface gauche, peut être contretenue, en totalité ou en partie, par l'emploi de tirants en fer équidistants, traversant le vide de la voûte au niveau des naissances ou à la hauteur des joints de rupture, ou même noyés dans les maçonneries d'extrados. Dans ce dernier cas, les tirants aboutissent à de fortes pattes d'ancre verticales également engagées dans les maçonneries, à peu près à l'aplomb de l'extrados des naissances des voûtes. Cette dernière position n'est guère praticable que pour des voûtes très-surbaissées, qui sont au reste précisement celles qui ont le plus de poussée. M. Navier indique, au paragraphe 341 de son ouvrage, les conditions d'après lesquelles les dimensions des tirants devraient être fixées, pour que les variations de température ne rendissent pas ce moyen inefficace. Figures 60 des planches.

Pour les voûtes à surface de révolution, on se sert de cercles à charnières formant des ceintures horizontales. C'est le moyen employé à la coupole de Saint-Pierre de Rome et à Saint-Paul de Londres. M. Navier indique également, au paragraphe 348 de l'ouvrage déjà cité plusieurs fois, le mode de calcul des dimensions de ces ceintures.

Dans les voûtes qui se pénètrent, et notamment dans les voûtes d'arête; chacune, avec ses piédroits *convenablement calculés*, peut être considérée comme un *contre-fort* relativement à l'autre; et il n'y aura qu'à s'assurer si le moment de résistance de ce contre-fort est suffisant, tant sous le rapport du glissement que sous celui du pirouettement. M. Navier, dans le paragraphe 349 de l'ouvrage ci-dessus, indique au reste les méthodes de calcul applicables aux voûtes d'*arête* et voûtes en *arc de cloître*.

Si des voûtes sont étagées les unes au-dessus des autres et correspondent aux mêmes piédroits prolongés; les dimensions de chacun de ces derniers devront être déterminées par une formule où serait: d'un côté le moment de résistance de ce piédroit sur sa base; et de l'autre les moments transversaux des poussées des diverses voûtes par rapport à la même base. On Voûtes étagées.

se rendrait compte ensuite si chaque système de voûte et de piédroits de chaque étage, est en état d'équilibre particulier.

Voûtes dans le même alignement.

Figures 61 des planches.

Lorsque sur le même plan plusieurs voûtes sont placées les unes à côté des autres, dans le même alignement rectiligne ou curviligne, on peut donner à ces voûtes et à leurs piédroits, soit des dimensions telles que chacune résiste isolément et indépendamment de l'appui que lui prêtent les voûtes voisines, soit des dimensions *réduites* d'après cette dernière considération. Si les voûtes ont leurs naissances à la même hauteur et sont de mêmes formes et dimensions, les poussées se neutraliseront, et le piédroit intermédiaire n'agira plus que comme support. Mais si les naissances sont à des hauteurs différentes, ou si les formes et dimensions des voûtes adjacentes ne sont pas les mêmes, il n'y aura qu'atténuation de la poussée la plus forte, et le piédroit devra résister à la différence.

Les culées ou piédroits des voûtes extrêmes de l'alignement, auront évidemment besoin d'un surcroît de résistance pour contre-balancer la poussée.

Toutes les formules et tables supposent que les parties supérieures et inférieures des voûtes fonctionnent comme un seul bloc, et ont la pesanteur spécifique et la dureté de la pierre de taille. Mais si les voûtes étaient construites en matériaux volumineux et menus diversement combinés, ou en maçonnerie uniquement de menus matériaux; et *à fortiori* si elles étaient en pierres sèches, il faudrait augmenter les dimensions données par les tables ou les formules, au moins dans le rapport des résistances des maçonneries en menus matériaux, à celles des pierres de taille calcaires des ponts de Nogent, Neuilly, etc.; et de plus laisser durcir les maçonneries des voûtes et celles des piédroits avant de les abandonner à elles-mêmes.

On trouvera dans les *Annales des ponts et chaussées de* 1834, 1835 et 1837; des expériences faites au port de Lorient sur la résistance d'anciennes voûtes en maçonneries de moellons; la description de deux demi-arceaux exécutés par le célèbre M. Brunel, en maçonnerie de briques et plâtre-ciment, et ayant chacun une saillie de 15 mètres sur le nu de la pile intermédiaire, qui n'avait que 1m,30 d'épaisseur; enfin des expériences de M. le capitaine du génie Olivier, sur des voûtes plates en briques à *crochet* et en plâtre.

*Systèmes d'appareil et de construction des voûtes.*

Dans les voûtes en pierres de taille, le nombre des rangées de voussoirs,

la longueur des voussoirs dans chaque rangée, dépendent de la nature et des dimensions des pierres dont on peut disposer. Les rangées de voussoirs peuvent être d'inégale largeur depuis la naissance jusqu'à la clef, pourvu qu'il y ait symétrie de chaque côté de la voûte. Dans l'appareil des *petits joints transversaux*, on cherche aussi à obtenir cette symétrie quand des considérations d'économie ne s'y opposent pas; mais la liaison complète des rangées de voussoirs adjacents réclame seulement, *en règle générale*, que les joints transversaux ne soient pas en prolongement les uns des autres, et soient à leurs points les plus rapprochés, séparés au moins par un intervalle de 15 centimètres mesuré suivant les lignes de voussoirs. On vient de dire *en règle générale*, car, par crainte de tassements différents dans la longueur d'une voûte ou par d'autres motifs, on peut avoir *systématiquement* à composer une voûte dans le sens de *sa longueur*, de plusieurs arceaux successifs et indépendants les uns des autres. Figures 62 des planches

Dans les voûtes légèrement biaises, pour qu'il n'y ait pas poussée au vide, on règle d'abord la longueur des voussoirs de tête, comme si la voûte était arrêtée à une section fictive droite; puis on ajoute sur chaque ligne de douelle aux premières longueurs des voussoirs, la distance entre cette section fictive et la tête biaise. Mais ce moyen exigerait des blocs d'une dimension énorme, si la voûte était fortement biaise. Dans ce dernier cas on fait un appareil de voussoirs de tête dont les arêtes sont normales à la tête biaise, puis on le raccorde, à une certaine distance de cette tête, avec un autre appareil de rangées de voussoirs parallèles à l'axe de la voûte : le *Traité de la construction des ponts* de Gauthey, ainsi que l'*Epure du pont de Trelport*, par feu Chezy, donnent les détails de cet appareil. Figures 63 des planches.

Les voussoirs d'une même rangée, ou d'une rangée à l'autre; peuvent être, comme dans les murs droits, appareillés en carreaux et boutisses, ou ne présenter que des boutisses. Ce dernier mode est évidemment beaucoup plus solide et le seul convenable quand les matériaux ne sont pas d'un fort échantillon; mais il est plus dispendieux que l'autre. Les clefs et contre clefs doivent toujours être en boutisses d'une grande longueur.

Voûtes extradossées parallèlement et de niveau.

Les voûtes peuvent être extradossées *parallèlement*, c'est-à-dire aboutir à une surface concentrique à celle de l'intrados, soit par les voussoirs eux-mêmes prolongés jusque-là, soit par des maçonneries de remplissage en petites pierres de taille, briques, libages ou moellons posés également en claveaux. Les voûtes peuvent aussi s'arrêter à une surface d'extrados de moindre ou plus grande courbure que celle de l'intrados, et même à

un plan horizontal passant ou incliné par l'extrados de la clef, auquel cas les voûtes sont dites extradossées en *chappe*.

Dans les calculs de résistance des voûtes et des piédroits, ces diverses combinaisons doivent être prises en considération.

Figures 64 des planches.

La formation d'une voûte extradossée parallèlement par plusieurs arceaux concentriques superposés les uns aux autres, la seule praticable au reste avec des matériaux de petite dimension, peut avoir l'inconvénient que l'arceau de l'intrados tasse et change de forme, tandis que les arceaux au-dessus, vers l'extrados, resteraient à leur position primitive; mais on y obvie en entrelaçant les voussoirs de ces arcs entre eux.

Figures 65 des planches.

Dans les têtes visibles des voûtes, les abouts des voussoirs sont apparents. On peut les extradosser parallèlement ou de niveau comme dans le reste de la longueur; mais comme les voussoirs des reins et des naissances ne pourraient souvent atteindre, à moins de dimensions colossales, le *plan* de *niveau passant par l'extrados* de la clef, on les arrête d'une part à des plans horizontaux étagés au-dessous du précédent, et d'autre part à des plans verticaux rachetant en hauteur les intervalles de ces plans. L'extrados de la tête de la voûte présente alors une sorte d'*escalier* à marches de hauteurs et largeurs variables. Mais il faut que la courbe qui passe par les angles *rentrants* de ces gradins, et qui peut être prise pour la courbe d'extrados, satisfasse aux conditions de résistance.

Quand les maçonneries de tête au-dessus des piédroits sont en pierres de taille, leurs lits horizontaux doivent correspondre aux plans horizontaux des abouts des voussoirs.

On renvoie, pour plus de détails, aux traités de coupe de pierres, aux appareils de grandes voûtes de ponts présentés dans les planches : des œuvres de Peyronnet; du *Traité de construction des ponts* de Gauthey; enfin des deux collections lithographiques de l'Ecole des ponts et chaussées.

Voûtes élégies.

—

Figures 66 des planches.

Si les piédroits des voûtes doivent être assis sur un terrain peu résistant, et qu'il faille réduire autant que possible la charge qu'ils portent, on élégit les maçonneries des voûtes, par d'autres voûtes ménagées au-dessus des piédroits, ou par des souterrains voûtés, compris, comme au nouveau pont de Bordeaux, entre l'extrados des voûtes et le sol au-dessus. Le premier genre d'élégissement est souvent motivé encore par d'autres considérations.

Voûtes formées de diverses espèces de matériaux.

Les maçonneries des voûtes peuvent être, comme celles des murs, formées de diverses combinaisons de matériaux. Ainsi, la clef, les nais-

sances et quelques rangées intermédiaires de voussoirs peuvent être en pierres de taille, et tout le reste en menus matériaux; les *têtes seules* peuvent aussi être en pierres de taille, et le reste en menus matériaux; enfin, les voûtes peuvent, dans leur longueur, être divisées en zônes par des chaînes équidistantes en pierres de taille; mais il y a alors à craindre l'inégalité du tassement.

Cependant ce système mixte est souvent employé dans les voûtes qui se pénètrent, telles que voûtes en arête, en arc de cloître, en pendentif, où l'on n'exécute en pierres de taille que *les arêtes mêmes de pénétration*.

Le tracé de l'appareil d'une voûte en pierres de taille seules, ou pierres de taille combinées avec d'autres matériaux, doit être fait de grandeur naturelle, afin que sur l'épure même on relève les dimensions des blocs et prépare les panneaux pour leur taille et leur pose. Tracé de l'appareil d'une voûte.

Lorsqu'on ne peut se procurer un vaste emplacement à couvert, on construit près du chantier de taille de pierres, une aire en bois ou en maçonnerie, généralement à mortier de plâtre ou chaux, que l'on couvre d'une couche générale de plâtre bien dressée.

Tant que les lignes de construction des courbes circulaires, elliptiques ou autres du profil des voûtes, n'ont pas plus de 10 mètres de longueur, on peut se servir de grandes règles, et appliquer les méthodes de tracé connues pour ces courbes. Mais au delà de cette dimension, les inflexions, les allongements et raccourcissements des règles par les influences atmosphériques rendraient leur emploi défectueux. Alors on cherche par le calcul les abscisses et ordonnées des divers points de la courbe; on construit celle-ci par points qu'on relie à l'aide de longues *lattes minces* en bois très-flexible. On maintient ces dernières dans la direction donnée, par des clous ou pointes enfoncés de distance en distance.

Sur la courbe ainsi construite, on effectue ensuite la division des rangées de voussoirs, en ayant égard pour les joints à l'épaisseur présumée de la couche de mortier intermédiaire.

Les normales aux courbes, à défaut d'aboutissement à des points de centre ou de foyers, et de procédés *praticables* sur une épure, s'obtiennent en considérant chaque portion de courbe correspondante à un point comme étant circulaire sur 30 à 40 centimètres de chaque côté de ce point, et en élevant une perpendiculaire sur la corde qui réunit les deux points ainsi symétriquement placés relativement à celui où la normale doit passer.

*Construction des voûtes, cintrement et décintrement.*

Les maçonneries des piédroits, et même des premières assises de retombée des voûtes, s'élèvent sans aucune difficulté jusqu'à une certaine hauteur; mais bientôt l'inclinaison des voussoirs oblige de les soutenir et de leur donner des points d'appui.

L'angle de frottement pour les corps polis est fixé, par l'expérience, à 18° 20′ avec l'horizon; mais l'observation a prouvé que les voussoirs, à cause de l'aspérité de leurs lits, ne commencent à glisser que lorsque cet angle est de 39°4′.

Des cintres. C'est au-dessus de ce point que l'on commence à être obligé de soutenir les voussoirs. On emploie généralement, à cet effet, un cintre de charpente, *formé de fermes équidistantes*, dont l'assemblage et les dimensions d'équarrissage des pièces élémentaires doivent être tels, que ce cintre sans altération sensible d'élasticité supporte le poids entier de la voûte, pendant la durée de la construction.

On exécute quelquefois les cintres en amas de terre argileuse massivée et pilonnée qui remplissent tout le vide des voûtes; et même dans les pays où le plâtre est commun, en maçonnerie de briques ou moellons avec plâtre, construite à faux-frais.

Figures 6e des planches. Une ferme de cintre, dans les constructions des voûtes d'une grandeur ordinaire, est formée par deux arbalétriers inclinés, qui s'arc-boutent dans le haut, contre un poinçon placé dans le petit axe, sur lequel ils s'assemblent à tenons avec embrèvement; ces arbalétriers prennent leur point d'appui dans le bas, sur les retraites des piédroits qui ont lieu au-dessous des naissances, et quelquefois sur des pierres saillantes nommées *corbeaux*. Les potelets assemblés perpendiculairement sur les arbalétriers supportent des pièces qui ont la courbure du cintre de face; on les nomme *vaux*; enfin une moise horizontale embrasse les arbalétriers et le poinçon, et consolide ainsi tout le système.

Dans les voûtes dont l'ouverture est au delà de 8 à 10 mètres, le nombre et le système d'assemblage des fermes des cintres en charpente, ont la même importance que dans les ponts en charpente, dont il sera parlé ultérieurement, et doivent être établis suivant les mêmes principes généraux que ces derniers.

Cintres fixes et cintres retroussés. On distinguait ordinairement les grands cintres en *fixes* et *retroussés*. Les cintres fixes étaient ceux qui, d'une rive à l'autre de la voûte, étaient

soutenus par de nombreux points d'appuis fixes. Ces points d'appuis empêchaient la charpente du cintre de prendre des flexions ondulées, sous le poids des voussoirs posés progressivement et symétriquement des naissances à la clef. Les cintres retroussés étaient ceux qui se soutenaient seuls par eux-mêmes et par la résistance des piédroits des voûtes en construction. Dans ce dernier système les rangs d'arbalétriers étaient placés sur plusieurs étages et sous diverses inclinaisons, et de manière que les abouts d'un rang répondaient aux milieux des longueurs des arbalétriers des rangs supérieurs ou inférieurs, avec lesquels ils formaient ainsi des figures triangulaires; des moises inclinées, dirigées suivant les normales aux cintres reliaient ces abouts aux pièces de bois au-dessus et au-dessous. Cette disposition permettait au système tout entier un relèvement vers la clef, puis un affaissement sous la charge, à mesure que celle-ci se rapprochait de la clef; mais ces mouvements alternatifs, difficiles à maîtriser, compliquaient beaucoup la pose des voussoirs.

Figures 68 des planches.

Figures 69 des planches.

Le système généralement adopté aujourd'hui est une combinaison des deux précédents; c'est-à-dire, que les cintres retroussés sont soutenus pendant la construction des voûtes comme les cintres fixes; et que lors du décintrement on commence par détruire ces appuis intermédiaires, pour que le cintre se prête graduellement au tassement de la voûte. Les collections lithographiques de l'Ecole des ponts et chaussées, le *Traité de la construction des ponts* de Gauthey, le *Traité de charpente* de M. le colonel Emy, présentent beaucoup d'exemples de cintres de diverses grandeurs diversement composés.

Figures 70 des planches.

Dans toutes les espèces de cintres, les *vaux* ne s'élèvent pas jusqu'à l'intrados de la douelle; on laisse un vide ou intervalle de 7 à 8 pouces (0m,19 à 0m,21) pour placer horizontalement et à angle droit, sur les fermes, de longues pièces nommées *couchis*, qui sont destinées à recevoir immédiatement les cours de voussoirs.

On a employé en Angleterre des cintres en fonte de fer pour les travaux par parties de longs souterrains.

Figures 71 des planches.

Dans le tracé et le levage des cintres, il faut tenir compte, 1° du tassement qu'ils éprouveront par eux-mêmes, soit par l'effet initial de la compression des bois dans les divers joints, soit par leur *flexibilité* entre leurs appuis; 2° du tassement que prendra la voûte elle-même, par suite de la largeur des joints et de la compressibilité des mortiers. On trouvera à cet égard des indications dans les œuvres de Régemortes, Bélidor, Peyronnet,

Gauthey, Boistard, et dans l'ouvrage souvent cité de M. Navier, intitulé : *Leçons données à l'Ecole des ponts et chaussées.* On a relaté ci-dessous les mouvements observés au pont de Neuilly. M. de Prony et M. l'Ingénieur Pichot, dans des notices insérées aux *Annales des ponts et chaussées* de 1832, ont présenté les observations et méthodes de calcul relatives aux voûtes du pont Louis XVI, et du pont du Sault sur le Rhône.

Pose des voussoirs. En suivant ces méthodes, on parviendra à marquer la position de chaque voussoir, sur le tracé des cintres *surhaussés*, et lors de leur mise en place, de manière qu'après le décintrement, la courbe, telle qu'elle était projetée, soit à peu près réalisée. Toutefois la portion du tassement correspondante à la compression et à la flexibilité des cintres, pourrait être déterminée par l'expérience sur une ferme d'essai, et avant le tracé définitif et la confection de tous les autres cintres. D'autre part, si au lieu de mortier entre les joints des pierres de taille l'on intercalait des *lames de plomb*, le tassement proprement dit des voûtes pourrait être atténué. Il le serait encore davantage si, comme M. l'Inspecteur divisionnaire Ch. Mallet l'avait fait au pont de Turin, les pierres étaient posées à sec ou avec un simple coulis de ciment ; mais on peut craindre alors des épaufrures dans les arêtes d'intrados et d'extrados, si la pose n'a pas été conduite *avec la prévision* de cette chance d'avaries.

C'est sur les cintres ainsi disposés, que l'on pose les voussoirs : ce travail, pour les voûtes de médiocre ouverture, n'exige que les soins que l'on doit apporter à la construction des voûtes en général ; mais pour le succès des grandes arches, il réclame les plus grandes précautions. Il doit être conduit de manière à neutraliser par l'inclinaison des joints et l'épaisseur sensible des couches de mortier, les effets des tassements qui auront lieu au décintrement, particulièrement vers les points de rupture.

Comme l'on ne peut vérifier la position exacte des voussoirs au moyen des rayons de courbure, lorsque les centres sont très-éloignés ; l'on détermine cette position, pour chaque voussoir, en calculant l'écartement horizontal ou *abscisse* entre les arêtes de la douelle, ainsi que l'*ordonnée* ou distance verticale qui appartient à ce voussoir. Au moyen de ces coordonnées et des repères fixes sur les piles et culées, il est facile de déterminer exactement, avec de longues règles et le niveau à bulle d'air, la place que chaque voussoir doit occuper.

La direction du plan du joint normal à la courbe et l'inclinaison de

chaque voussoir est vérifiée au moyen d'un quart de cercle, dont les divisions du limbe sont calculées pour chaque voussoir.

L'usage de ce quart de cercle est facile; on adapte l'un des côtés au lit du voussoir, et le fil auquel est attaché le plomb dont ce quart de cercle est armé, doit couvrir la division numérotée du voussoir : dans le cas contraire, au moyen d'une *calle*, le poseur augmente ou diminue l'inclinaison du voussoir jusqu'à ce que le fil tombe sur la division convenable. Dans cette position, s'il satisfait aux coordonnées horizontales et verticales, l'on est assuré que le voussoir occupe sa véritable place. Indépendamment du bon choix des matériaux, de la précision de l'exécution suivant les règles que l'on vient de prescrire, et de la qualité des mortiers; le succès de la construction des grandes voûtes dépend encore particulièrement du système des cintres qu'on aura adopté, de leur assemblage et du procédé du décintrement.

Il est évident, du reste, que si plusieurs voûtes sont consécutives, et que leurs piédroits ne soient pas d'une force suffisante pour résister à la poussée isolée d'une voûte, il faut les cintrer à la fois, et les élever et décintrer simultanément; à moins toutefois qu'on ne puisse relier temporairement les naissances de chaque voûte.

Il est essentiel, pour diriger avec succès la marche de la construction des grandes voûtes, de connaître les divers mouvements qui ont lieu dans les cintres, ainsi que dans les voûtes elle-mêmes, pendant et après leur construction.

D'abord, et immédiatement après le levage des cintres, ces derniers s'affaissent sous leur propre poids, et successivement sous celui des voûtes.

Dès qu'on pose les voussoirs des reins de la voûte, l'effet de leurs poids tend au contraire à faire remonter le cintre vers la clef.

On s'oppose à cet effet en chargeant provisoirement les fermes des cintres vers leurs sommets avec un certain nombre de voussoirs, ou avec des poids amovibles.

A mesure que les voûtes s'élèvent, les cintres s'affaissent de nouveau; ce nouvel effet est dû au poids des voussoirs. Au moment de la pose des clefs du pont de Neuilly, l'affaissement des cintres était de $0^m,354$, environ 13° 3 lignes. Les figures 72 des planches représentent les tassements observés après le décintrement à l'arche de Nogent à l'aide de lignes de repère, tracées avant l'opération sur les deux têtes de cette arche. Figures 72 des planches.

Il résulte de ces divers mouvements dans le système de la voûte, d'abord

une ouverture dans la partie supérieure des joints des voussoirs, à peu de distance de l'aplomb des naissances, et ensuite plus haut ; mais ces joints se referment après que les clefs sont posées.

La charge totale des cintres, pour chaque arche du pont de Neuilly était de 2,400,000 liv. (1,175,800 kil.) L'affaissement des fermes, sous cette charge, a continué jusqu'au moment du décintrement. A cette époque l'affaissement total était de $0^m,52$, environ 19 pouces.

Pour diminuer le tassement des voûtes, l'ancien usage était de poser à sec les derniers cours des voussoirs, et de les serrer avec des coins de bois, fortement chassés entre des *lattes savonnées*. Cette méthode avait l'inconvénient d'occasionner la rupture des voussoirs. On y a renoncé avec raison ; les clefs et les contre-clefs sont posées sur un lit de mortier, coulé et garni comme les autres voussoirs.

Décintrement. Il n'y a pas d'époque fixée pour effectuer le décintrement des arches relativement à la solidité qui peut résulter de l'accélération ou du retardement de cette opération.

On n'a aperçu aucune différence sensible dans les mouvements d'arches décintrées immédiatement après la pose des clefs, ou après avoir laissé consolider les mortiers.

La prudence paraît exiger cependant qu'on attende cette dernière époque, c'est-à-dire 15 jours, plus ou moins, suivant la porosité de la pierre et la nature des matériaux et mortiers.

En effet, si l'on décintre trop tôt, il peut arriver qu'entre les points de rupture il y ait des disjonctions entre les éléments de la voûte qui doivent fonctionner comme un seul bloc ; et si d'un autre côté l'on attend que les mortiers soient complétement durcis, il s'y manifestera des ruptures permanentes lors du décintrement ; cet inconvénient est moindre que l'autre. Pour les voûtes en petits matériaux, tels que les moellons piqués, smillés et bruts, et les briques, il faut nécessairement attendre le durcissement des mortiers hydrauliques. Gauthey a fait observer, relativement aux voûtes qui sont composées de plusieurs rangs de claveaux superposés, que pour forcer les cours supérieurs de suivre le tassement des cours inférieurs, il fallait dans la pose y serrer beaucoup les joints à l'*intrados*, en les laissant très-ouverts à l'*extrados*.

A mesure qu'on enlève les couchis et qu'on décharge les cintres, ils tendent nécessairement à remonter en se relevant.

Le point de rupture des voûtes, que les expériences faites par Peyronnet

ont placé, dans le cas défavorable, vers le tiers de la demi-voûte, prouve qu'on peut enlever sans inquiétude les couchis depuis les naissances jusque vers ce point, puisque dans cette partie les cintres sont repoussés vers la voûte par la charge des voussoirs supérieurs.

On doit enlever *très-lentement* ces couchis pour éviter que la partie de la voûte qui descend ne prenne une certaine vitesse. La chute de l'arche serait le résultat d'une manœuvre trop précipitée.

On continue le décintrement par l'enlèvement successif des couchis en allant vers la clef. On les ôte symétriquement des deux côtés de chacune des voûtes.

Cette opération a duré 19 jours pour les voûtes du pont de Neuilly. Les sept derniers cours de couchis ont été enlevés dans le dernier jour.

A mesure que l'on enlevait les couchis, on les remplaçait par des étrésillons en bois debout, posés entre la ferme des cintres et la voûte.

Tous les couchis enlevés, ces étrésillons ont été ruinés au ciseau. Cette opération n'a duré qu'une heure : à mesure qu'on s'approchait de la clef ils s'écrasaient sous le poids de la voûte, qui prenait un tassement successif et uniforme.

Les fermes étant libres se sont relevées de $0^m,162$, environ 6°, par l'élasticité des bois.

Pendant l'enlèvement des couchis, les voûtes ont tassé de $0^m,162$, ou 6°; pendant la ruine des étrésillons, le tassement a été de $0^m,030$, ou 18 lignes, et le lendemain de $0^m,029$, ou 13 lignes; il a été ensuite en diminuant.

A cette époque on a posé le pavé, les parapets, et peu de temps après le tassement a totalement cessé; après l'achèvement complet des ouvrages, le tassement total a été de $0^m,297$, environ 11°.

Les figures 73 des planches indiquent d'autres procédés employés pour détacher les cintres des voûtes. Figures 73 des planches

Les maçonneries des reins des voûtes, ainsi que celles qui sont au-dessus des clefs, ne sont posées qu'après le tassement qui suit le décintrement, et afin de conserver l'horizontalité des lits et la verticalité des joints dans les appareils de raccordement avec la voûte.

La conservation des voûtes entre leurs têtes, surtout quand elles ne sont pas abritées, exige qu'on les préserve des infiltrations d'eaux pluviales et autres, qui délaveraient les mortiers, et pourraient même altérer les pierres, briques, etc. On dresse en conséquence leurs extrados en pentes longitudinales et transversales à deux versants; afin de faire couler les eaux, soit par des tuyaux ménagés verticalement ou en descente dans les zones Conservation des voûtes Figures 74 des planches.

intercalaires aux têtes des voûtes, soit par des tuyaux débouchant dans ces têtes elles-mêmes. Un enduit général, nommé *chappe*, en plâtre-ciment, en béton ou en mastic bitumineux, forme le dessus de cette nappe ondulée à l'extrados. On a même proposé des feuilles de plomb et de zinc pour faire une espèce de couverture extérieure au-dessus des voûtes.

Pénétrations de divers projectiles de guerre dans les massifs de terres ou de maçonneries.

Dans un assez grand nombre de circonstances, les ouvrages d'un intérêt général doivent, non-seulement satisfaire aux conditions ordinaires de durée, de résistance à des charges statiques permanentes; mais de plus ils doivent soutenir les efforts accidentels ou *forces vives* de masses plus ou moins considérables animées de vitesses variables.

On verra dans la dernière partie, relative aux travaux de navigation extérieure, quelle puissance destructive manifestent les vagues de la mer dans les tempêtes.

Dans les zônes de défense territoriale, et particulièrement dans les traversées des places fortes, on est forcé souvent de se prémunir contre les effets du tir des projectiles.

On a donc jugé utile de présenter ici quelques données puisées dans les ouvrages relatifs à l'art militaire.

Le ricochet des boulets a lieu à la charge en poudre du $\frac{1}{4}$ du poids du boulet sous les angles, de 5° sur l'eau, 8° sur la terre ferme, 26° sur le bois, 33° sur la maçonnerie. Avec une charge plus forte, les boulets ne pourraient ricocher que sous des angles plus aigus.

Les projectiles ricochent mieux sur l'eau que sur la terre; et les boulets de gros calibre perdent peu de leur force sous l'angle de 2 à 3°.

La profondeur de l'enfoncement d'un projectile dans un milieu résistant est en raison directe du diamètre de ce projectile, de sa densité, du carré de sa vitesse, et en raison inverse de la ténacité du milieu.

Pour des vitesses qui ne dépassent pas 15 mètres par seconde, la résistance des corps facilement pénétrables, est indépendante de la vitesse du projectile, et seulement proportionnelle à l'aire de la section diamétrale.

L'action des obus sur les maçonneries est peu considérable; souvent ils s'y brisent avec de faibles charges et ne produisent que des enfoncements insignifiants.

Les tables suivantes ont été dressées par M. le capitaine d'artillerie Piobert.

*Table de pénétration des projectiles dans les terres rassises, moitié sable, moitié argile.*

| ESPÈCE des projectiles. | POIDS de la charge. | DISTANCE DE | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 25 m | 50 m. | 100 m | 200 m. | 300 m | 400 m. | 500 m. | 600 m | 800 m. | 1000 m |
| | kilog | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. |
| Boulets de 36. . . . | 6 00 | 2,77 | 2,70 | 2,60 | 2,47 | 2,37 | 2,27 | 2,18 | 2,09 | 1.92 | 1,77 |
| Boulets de 24. . . . | 6,00 | 2,75 | 2,67 | 2,52 | 2,31 | 2,14 | 2,02 | 1,93 | 1,84 | 1,68 | 1,54 |
| | 4,00 | 2,55 | 2,48 | 2,35 | 2,18 | 2,06 | 1,96 | 1,87 | 1,78 | 1,62 | 1,48 |
| | 3,00 | 2,35 | 2,29 | 2,20 | 2,07 | 1,97 | 1,88 | 1,79 | 1,71 | 1,57 | 1,45 |
| Boulets de 16. . . . | 4.00 | 2,40 | 2,31 | 2,18 | 1,97 | 1,83 | 1,72 | 1,64 | 1,56 | 1,42 | 1,28 |
| | 2,67 | 2,20 | 2,12 | 2,02 | 1,87 | 1,76 | 1,67 | 1,59 | 1,52 | 1,38 | 1,25 |
| | 2,00 | 2,05 | 1,99 | 1,91 | 1,77 | 1,69 | 1,61 | 1,54 | 1,47 | 1,33 | 1,20 |
| Boulets de 12. . . . | 2,00 | 1,65 | 1,61 | 1,52 | 1,39 | 1,29 | 1,22 | 1,15 | 1,09 | 0,98 | 0,89 |
| | 1,50 | 1,54 | 1,50 | 1,42 | 1,32 | 1,24 | 1,17 | 1,11 | 1,05 | 0 95 | 0,86 |
| Boulets de 8 . . . . | 1,25 | 1,43 | 1,39 | 1,32 | 1,19 | 1,10 | 1,02 | 0,95 | 0,90 | 0,81 | 0,73 |
| Obus de 8 p. . . . | 2,00 | 1,23 | 1,20 | 1,15 | 1,06 | 0,98 | 0 90 | 0,83 | 0,74 | 0,66 | 0,59 |
| | 1,50 | 1,09 | 1,06 | 1,02 | 0,94 | 0,86 | 0,79 | 0,74 | 0,69 | 0,61 | 0,55 |
| | 1,00 | 0,88 | 0,86 | 0,82 | 0,75 | 0,70 | 0,65 | 0,61 | 0,58 | 0,53 | 0,49 |
| Obus de 6 p. . . . | 1,50 | 1,34 | 1,30 | 1,24 | 1,14 | 1,04 | 0,95 | 0,86 | 0,78 | 0,64 | 0,56 |
| | 1,00 | 1,15 | 1,12 | 1,08 | 0,98 | 0,89 | 0,81 | 0,74 | 0,67 | 0,57 | 0,50 |
| | 0,75 | 1,01 | 0,98 | 0,94 | 0,85 | 0,78 | 0,71 | 0,65 | 0,60 | 0,52 | 0,46 |
| Obus de 24 p. . . | 1.00 | 1,13 | 1,09 | 1,04 | 0,93 | 0,83 | 0,74 | 0,66 | 0,59 | 0,48 | 0,41 |
| | 0,50 | 0,85 | 0,82 | 0,78 | 0,70 | 0,63 | 0,57 | 0,51 | 0,46 | 0,39 | 0,34 |
| Obus de 12 p. . . . | 0,27 | 0,69 | 0,67 | 0,63 | 0,55 | 0,49 | 0,44 | 0 40 | 0,37 | 0,31 | 0,26 |
| Balles de fusil d'inf. | 0,010 | 0,27 | 0,25 | 0,22 | 0,15 | 0,11 | 0,08 | 0,06 | 0,04 | » | » |
| *Id.* de rempart. . . | 0,008 | 0,30 | 0,28 | 0,24 | 0,19 | 0,15 | 0,12 | 0,10 | 0,08 | » | » |

On obtient les enfoncements des divers projectiles dans des terres d'une autre nature, en multipliant les pénétrations indiquées dans la table précédente :

Pour le sable mêlé de gravier, par. . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 0,63
Pour la terre mêlée de sable de gravier, pesant plus de deux fois le poids de l'eau. 0,87
Pour les terres végétales rassises, et pour les terres rapportées, mêlées de sable et d'argile. . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 1,09
Pour l'argile de potier humide . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 1,44
Pour la même argile mouillée. . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 2,10
Pour les terres légères d'ancien parapet. . . . . . . . . . . . . . . . . . . 1,50
Pour les mêmes nouvellement remuées. . . . . . . . . . . . . . . . . . . 1,90

*Table de pénétration des projectiles dans les maçonneries en moellons de bonne qualité.*

| POIDS des projectiles. | POIDS de la charge | DISTANCE DE | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 25 m | 50 m | 100 m. | 200 m. | 300 m. | 400 m. | 500 m. | 600 m. | 800 m. | 1000 m |
| | kilog | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. |
| Boulets de 36 . . . | 6,00 | 0,68 | 0,67 | 0,65 | 0,61 | 0,57 | 0,53 | 0,50 | 0,46 | 0,38 | 0,31 |
| Boulets de 24. . . | 6,00 | 0,65 | 0,64 | 0,62 | 0,57 | 0,53 | 0,49 | 0,45 | 0,42 | 0,34 | 0,28 |
| | 4,00 | 0,62 | 0,61 | 0,58 | 0,54 | 0,50 | 0,46 | 0,42 | 0,39 | 0,31 | 0,25 |
| | 3,00 | 0,58 | 0,57 | 0,55 | 0,51 | 0,47 | 0,43 | 0,39 | 0,35 | 0,29 | 0,23 |
| Boulets de 16. . . . | 4,00 | 0,57 | 0,56 | 0,53 | 0,49 | 0,45 | 0,41 | 0,37 | 0,33 | 0,26 | 0,20 |
| | 2,67 | 0,54 | 0,53 | 0,50 | 0,46 | 0,42 | 0,38 | 0,34 | 0,30 | 0,24 | 0,19 |
| | 2,00 | 0,50 | 0,49 | 0,47 | 0,43 | 0,39 | 0,35 | 0,31 | 0,28 | 0,22 | 0,17 |
| Boulets de 12. . . . | 2,00 | 0,48 | 0,47 | 0,45 | 0,41 | 0,37 | 0,33 | 0,29 | 0,26 | 0,20 | 0,16 |
| | 1,50 | 0,45 | 0,44 | 0,42 | 0,38 | 0,34 | 0,30 | 0,26 | 0,23 | 0,18 | 0,14 |
| Boulets de 8 . . . . | 1,25 | 0,41 | 0,40 | 0,38 | 0,34 | 0,30 | 0,26 | 0,23 | 0,19 | 0,14 | 0,11 |

*Table de pénétration des bombes lors de leur chute.*

| ESPÈCE DE MATÉRIAUX. . . . . | | Terres rassises. | | | Bois de chêne. | | | Maçonneries. | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CALIBRE DES BOMBES. . . . . . | | 8° | 10° | 12° | 8° | 10° | 12° | 8° | 18° | 12° |
| *Angles de tir et distances.* | | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. |
| Angles de tir . . . 30° | Distances . 600 m. | 0,20 | 0,45 | 0,50 | 0,10 | 0,10 | 0,22 | 0,05 | 0,09 | 0,10 |
| 30° | 1200 m | 0,25 | 0,65 | 0,70 | 0,12 | 0,30 | 0,35 | 0,06 | 0,12 | 0,13 |
| 45° | 600 m | 0,30 | 0,50 | 0,55 | 0,15 | 0,25 | 0,27 | 0,08 | 0,10 | 0,11 |
| 45° | 1200 m. | 0,40 | 0,70 | 0,75 | 0,20 | 0,35 | 0,40 | 0,10 | 0,14 | 0,15 |
| 60° | 600 m. | 0,50 | 0,75 | 0,80 | 0,22 | 0,33 | 0,37 | 0,11 | 0,15 | 0,16 |
| 60° | 1200 m. | 0,55 | 0,80 | 0,85 | 0,25 | 0,35 | 0,40 | 0,12 | 0,16 | 0,17 |
| Pénétration avec la plus grande vitesse qoe la bombe puisse acquérir daos l'air en tombaot. . . . . | | 0,60 | 0,85 | 0,90 | 0,25 | 0,35 | 0,40 | 0,12 | 0,17 | 0,18 |

Pour connaître l'effet total des bombes et des obus dans les terres ordinaires, il faut, aux enfoncements des projectiles pleins, ajouter l'effet de l'explosion de la charge que contiennent les projectiles creux, et qui répond à une sphère de rupture d'environ 2 mètres cubes par kilogramme de poudre.

On obtient les enfoncements des divers projectiles dans les autres maçonneries, en multipliant les pénétrations indiquées dans les deux tables précédentes :

| | |
|---|---|
| Pour la maçonnerie de médiocre qualité en moellons, par . . . . . . . | 1,25 |
| Pour la maçonnerie de briques . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . | 1,75 |
| Pour les roches calcaires oolithiques des Geniveaux près de Metz . . . | 0,46 |

*Table de pénétration des projectiles dans le bois de chêne de qualité ordinaire.*

| ESPÈCE de projectiles. | POIDS de la charge. | DISTANCES DE | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 25 m. | 50 m. | 100 m. | 200 m. | 300 m. | 400 m | 500 m | 600 m. | 800 m. | 1000 m |
| | kilog. | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. |
| Boulets de 36 . . . . | 6,00 | 1,66 | 1,63 | 1,58 | 1,48 | 1,38 | 1,29 | 1,20 | 1,12 | 0,95 | 0,80 |
| Boulets de 24. . . . | 6,00 | 1,60 | 1,56 | 1,50 | 1,39 | 1,29 | 1,20 | 1,11 | 1,02 | 0,85 | 0,70 |
| | 4,00 | 1,50 | 1,47 | 1,42 | 1,31 | 1,21 | 1,12 | 1,03 | 0,95 | 0,78 | 0,63 |
| | 3,00 | 1,41 | 1,38 | 1,33 | 1,23 | 1,14 | 1,05 | 0,96 | 0,88 | 0,72 | 0,58 |
| Boulets de 16 . . . . | 4,00 | 1,39 | 1,35 | 1,29 | 1,18 | 1,08 | 0,99 | 0,90 | 0,81 | 0,65 | 0,51 |
| | 2,67 | 1,30 | 1,27 | 1,22 | 1,11 | 1,02 | 0,93 | 0,84 | 0,76 | 0,60 | 0,47 |
| | 2,00 | 1,21 | 1,18 | 1,13 | 1,04 | 0,95 | 0,86 | 0,78 | 0,70 | 0,55 | 0,43 |
| Boulets de 12 . . . . | 2,00 | 1,17 | 1,14 | 1,09 | 0,98 | 0,89 | 0,81 | 0,73 | 0,65 | 0,50 | 0,37 |
| | 1,50 | 1,10 | 1,07 | 1,02 | 0,93 | 0,84 | 0,76 | 0,68 | 0,60 | 0,46 | 0,34 |
| Boulets de 8. . . . | 1,25 | 1,00 | 0,97 | 0,91 | 0,82 | 0,73 | 0,65 | 0,57 | 0,49 | 0,35 | 0,27 |
| Obus de 8 p. . . . . | 2,00 | 0,72 | 0,70 | 0,66 | 0,57 | 0,49 | 0,45 | 0,37 | 0,33 | 0,27 | 0,23 |
| | 1,50 | 0,59 | 0,57 | 0,53 | 0,46 | 0,40 | 0,32 | 0,31 | 0,28 | 0,24 | 0,21 |
| | 1,00 | 0,41 | 0,39 | 0,36 | 0,32 | 0,29 | 0,26 | 0,24 | 0,22 | 0,20 | 0,19 |
| Obus de 6 p. . . . . | 1,50 | 0,84 | 0,81 | 0,77 | 0,68 | 0,60 | 0,52 | 0,45 | 0,38 | 0,30 | 0,25 |
| | 1,00 | 0,70 | 0,68 | 0,64 | 0,55 | 0,47 | 0,40 | 0,34 | 0,29 | 0,23 | 0,20 |
| | 0,75 | 0,58 | 0,56 | 0,52 | 0,44 | 0,37 | 0,32 | 0,28 | 0,25 | 0,21 | 0,18 |
| Obus de 24. . . . . | 1,00 | 0,70 | 0,68 | 0,64 | 0,55 | 0,46 | 0,38 | 0,31 | 0,26 | 0,20 | 0,16 |
| | 0,50 | 0,48 | 0,46 | 0,42 | 0,34 | 0,28 | 0,24 | 0,21 | 0,19 | 0,16 | 0,13 |
| Obus de 12 p . . . | 0,27 | 0,38 | 0,36 | 0,32 | 0,26 | 0,21 | 0,18 | 0,16 | 0,15 | 0,12 | 0,10 |
| Balles de fosil d'inf | 0,010 | 0,090 | 0,080 | 0,065 | 0,045 | 0,027 | 0,018 | 0,012 | 0,008 | • | • |
| *Id.* de rempart . . . | 0,008 | 0,090 | 0,085 | 0,075 | 0,057 | 0,045 | 0,035 | 0,030 | 0,025 | • | • |

On obtient les enfoncements des projectiles dans les autres essences de bois, en multipliant les pénétrations indiquées dans la table précédente :

| | |
|---|---|
| Pour le hêtre, le charme et le frêne, par . . | 1,00 |
| Pour l'orme. . . . . . . . . . . . . . . . . | 1,30 |
| Pour le sapin et le bouleau . . . . . . . . . | 1,80 |
| Pour le peuplier . . . . . . . . . . . . . . | 2,00 |

On met le bois à l'épreuve de tout projectile, en le couvrant de bandes de fer qui se recroisent, ayant $0^m,12$ d'épaisseur, et espacées entre elles de $0^m,08$.

Voûtes et piédroits à l'épreuve des bombes.

L'on admet en général que des voûtes de dimensions ordinaires, pour résister à la bombe, ont besoin de 1 mètre d'épaisseur aux reins, et d'être recouvertes de terre. Voici les formules *pratiques* pour calculer les épaisseurs :

1° Voûtes en plein cintre extradossées de niveau ( *a* épaisseur cherchée en mètres, D diamètre en mètres ) ...... $a = \frac{5D + 46^m,77}{144}$.

2° Voûtes en anse de panier, même formule, en prenant pour D le double du rayon de l'arc du sommet.

3° Voûtes en plein cintre, extradossées en chappe; $b$ épaisseur dans les reins, en supposant que les épaisseurs aux reins, naissances et clefs, soient dans le même rapport que dans les voûtes de Vauban $b = 0,342\sqrt{D}$.

C'est-à-dire que les épaisseurs aux reins sont les ordonnées d'une parabole où les abscisses représentent les diamètres des voûtes.

4° Voûtes surbaissées en arc de cercle. Même formule; mais pour l'appliquer, il faudra prendre comme coefficient une fonction du rapport des cordes et flèches de la voûte donnée, avec celles d'une voûte surbaissée qui ait réussi dans la pratique.

5° les piédroits supportant une voûte à l'épreuve de la bombe, et agissant comme *culées*, ont ordinairement pour épaisseur la moitié du rayon extrados de la voûte. Si ces piédroits sont eux-mêmes directement exposés aux projectiles, il faudra augmenter leur épaisseur d'autant.

*Observations communes à toutes les conditions de résistance des maçonneries de toute espèce.*

Dans tout ce qui précède, on a supposé que les maçonneries, au moment où elles sont soumises à leurs charges permanentes ou accidentelles, auraient au moins atteint, par le durcissement, les chiffres de résistance donnés dans les leçons antérieures.

Les maçonneries entièrement en pierres de taille, où le mortier contribue le moins à la résistance, et a plutôt pour objet d'empêcher les actions atmosphériques, peuvent être mises en service presque immédiatement après leur achèvement.

Il n'en est pas de même des maçonneries de libages, de moellons, de briques, en mortiers ordinaires, ou en mortiers d'une hydraulicité peu énergique; et surtout des maçonneries de béton. Ici le temps est un élément indispensable du succès, aussi bien pour le durcissement que pour le *tassement*. De grands ouvrages civils et hydrauliques ont éprouvé des avaries graves, quelquefois irréparables, par la précipitation qu'on a mise à les faire fonctionner, lorsque les matériaux des maçonneries étaient encore incomplétement agrégés, et que les massif de béton étaient encore dans un état de pâte ferme et même visqueuse.

Il importe donc de bien s'assurer de la dureté acquise par les diverses

espèces de maçonneries avant de les faire fonctionner. Dans cet examen on devra ne pas se borner aux couches extérieures des maçonneries qui durcissent plus rapidement que les autres, mais rechercher surtout la résistance des couches centrales.

Comme cette vérification ne sera pas toujours facile dans beaucoup d'ouvrages, il sera utile d'avoir des blocs d'essai ou d'échantillon placés dans les mêmes circonstances que les maçonneries exécutées, et dont l'examen soit possible en tout temps.

---

## RÉSUMÉ DE LA TREIZIÈME LEÇON.

DES FONDATIONS EN GÉNÉRAL. — DU SONDAGE. — DES DIVERSES NATURES DE TERRAINS. — DES FONDATIONS ARTIFICIELLES. — DU PILOTIS. — DU BATTAGE DES PIEUX. — DES GRILLAGES DE FONDATION.

—

### *Des fondations en général.*

Les fondations civiles et hydrauliques sont à la fois la partie la plus essentielle et souvent la plus coûteuse et la plus difficile de l'art des contructions; toute considération d'économie dans la dépense première doit disparaître devant la considération bien plus grave, qu'une fondation défectueuse étant un mal presque irrémédiable, ferait perdre les fruits de toutes les dépenses des établissements superposés au-dessus. Considérations générales.

Les fondations doivent résister à tous les genres d'efforts *permanents* ou *éventuels* auxquels seront soumis les ouvrages au-dessus. Ainsi il ne suffit pas qu'elles ne puissent pas s'affaisser sous le poids de ces derniers, il faut de plus qu'elles ne cèdent pas à des efforts obliques ou parallèles à leur assiette, tels que poussées de voûtes, de terres, de liquides, etc.

En règle générale, l'assiette des fondations doit être une surface normale aux résultantes des efforts *permanents* et *éventuels*; elle doit être assez étendue pour que ces résultantes la pénètrent intérieurement, et à une distance de son périmètre telle, que la zône environnante de ces points d'intersection puisse résister. Toutefois il ne sera pas toujours possible de satisfaire à la première condition; notamment quand une partie des efforts

serait permanente et l'autre accidentelle, comme, par exemple, dans un mur de perré qu'il s'agirait d'élever sans y adosser immédiatement des remblais, et qui ne fonctionnerait comme un seul bloc qu'après le complet durcissement des mortiers. Alors on décompose la résultante générale des efforts : 1° en une force normale à l'assiette qu'il est possible de donner aux fondations; 2° en une force parallèle à cette assiette, à laquelle on a soin d'opposer une résistance correspondante.

Il faut aussi que la fondation soit engagée assez profondément dans le sol pour que, dans les hypothèses les plus défavorables de modifications dans le terrain environnant, elle ne soit jamais mise à nu ou *déchaussée*, suivant l'expression vulgaire. Cette espèce d'encastrement, dans un terrain même solide à la superficie, n'est pas ordinairement moindre de 0m,60; et elle a l'avantage de fournir un appui contre les efforts qui tendraient à faire glisser les fondations sur le sol.

Classification des terrains comme assiette de fondation

Les Ingénieurs distinguent ordinairement trois espèces différentes de sol, relativement à leur bonne ou mauvaise qualité, pour y asseoir une fondation.

La première classe comprend les sols durs, tels que roc de toute espèce, le tuf, les terrains pierreux qu'on ne peut attaquer qu'à la mine ou au pic.

La deuxième présente les terrains graveleux et sablonneux : ils sont incompressibles lorsqu'ils sont encaissés, et que l'eau ne peut les traverser.

Enfin, la troisième classe comprend les sols terreux de toute espèce, depuis la terre végétale jusqu'à l'argile; les terrains tourbeux, vaseux, enfin tous ceux qui sont susceptibles de compression.

La première classe offre les terrains les plus favorables pour y asseoir solidement toute espèce de fondation.

La troisième classe, comprend les sols réputés mauvais, et qui opposent les plus grandes difficultés, soit qu'il s'agisse de les consolider, soit d'obtenir dans toute la superficie de la fondation une égalité de compression qui assure la stabilité de l'édifice.

*Des sondages.*

Il est donc très-important de bien connaître à l'avance l'espèce de terrain sur lequel doit reposer une fondation, afin de déterminer les moyens

de construction qu'il convient d'employer, et la dépense qui en résultera. Cette connaissance du terrain s'acquiert au moyen des sondes faites de distance en distance, non-seulement sur la direction de l'axe du projet, mais encore sur des lignes transversales à cet axe, et qui doivent s'étendre même jusqu'au delà de la largeur du projet.

On emploie à cet effet un instrument de fer portant sur sa longueur, et surtout vers la pointe destinée à être enfoncée dans le terrain, des entailles que l'on garnit de suif. On fait pénétrer la sonde en frappant sa tête avec une masse de fer, et quelquefois au moyen d'un mouton. Figures 75 des planches.

La sonde que l'on retire en la faisant tourner au moyen d'un levier qui passe dans un œil percé près de la tête, rapporte des portions du terrain qui se sont logées dans les entailles à la place du suif : ces échantillons en indiquent la nature.

Il est essentiel de pousser cet examen le plus bas possible, au moyen de sondes ou barres additionnelles qui s'adaptent à vis les unes aux autres.

Mais quand il faut pénétrer très-avant dans le terrain, il est très-difficile d'arracher les barres. On y substitue alors une sonde terminée inférieurement par une tarière qui rapporte un échantillon du terrain quand on la retire en tournant en sens contraire. La tige de la sonde est composée de plusieurs barreaux de fer assemblés à tenon et mortaise dans le sens de la longueur, et tenus par des clavettes. Figures 76 des planches.

Pour en faire usage sous l'eau, on bat des pieux *forés* comme des corps de pompes ordinaires, cutés au besoin, et armés de fer à leur extrémité inférieure. On enlève successivement avec la tarière la terre qui s'introduit dans le vide du pieu par son orifice inférieur.

On s'est borné souvent à enfoncer, à grands intervalles, des pieux de reconnaissance d'une longueur déterminée, et l'on appréciait la résistance du terrain d'après la résistance au battage.

Ces moyens ont donné quelquefois néanmoins de très-fausses indications(1). Il faut y joindre des puits de vérification poussés au moins jusqu'à la profondeur des terrains *vierges*.

Les puits peuvent être creusés à l'aide de coffres à section carrée, rectangulaire ou circulaire, armés de fer à leur pourtour inférieur. On en-

(1) Voir dans la *Deuxième collection lithographique de l'école des ponts et chaussées* les résultats des pieux de sondage aux fondations du pont de Bergerac.

fonce ces caisses comme des pieux par le battage; puis avec la tarière on enlève la terre de l'intérieur. Quand un coffre est engagé, on le prolonge par-dessus avec d'autres de même grandeur, ou bien en introduisant un second coffre d'une section plus petite. On renvoie pour plus de détails sur le sondage des terrains, à l'ouvrage de M. l'Ingénieur des mines Garnier, sur le *Forage des puits artésiens*; à des notices sur ces mêmes forages, insérées dans les *Annales des ponts et chaussées* de 1836; enfin aux dessins des collections lithographiques de l'École des ponts et chaussées.

*Système de fondations directement appuyées sur le sol naturel.*

Terrains de première classe.

Les terrains de première classe, quoique susceptibles de recevoir directement les fondations d'ouvrages ordinaires, doivent être l'objet d'un examen attentif dans les constructions d'une *grande élévation*.

Ainsi, s'ils sont décomposables à l'air ou à l'eau, il faudra les préserver de ces influences en les recouvrant par des maçonneries ou *des enduits* inaltérables. Si ces terrains sont feuilletés par couches minces ou fendillées en tous sens, il faudra rechercher leur résistance par de nombreux essais. Enfin, si ces couches sont inclinées il conviendra également de s'assurer si elles ne pourraient pas glisser sous les composantes des efforts parallèles aux plans des couches, et de disposer les constructions de manière à augmenter l'adhésion des couches du rocher entre elles.

Si le terrain est d'inégale résistance, il s'agira de rechercher quel en est le minimum, et d'y avoir égard, en répartissant la charge proportionnellement aux résistances, par des élargissements dits *empatements* dans les maçonneries d'assiette, et par des épaississements calculés suivant les règles indiquées à l'article *maçonneries*.

Enfin il y a des localités (un exemple s'est montré aux fondations du nouveau pont de Rouen) où des bancs de rocher très-durs sont superposés à d'autres moins résistants; et il est nécessaire alors de répartir la charge d'après la dureté minimum de ces couches inférieures.

Dans tous les cas, loin d'aplanir l'assiette des fondations, il sera utile d'y laisser le plus d'aspérités possibles, et d'y pratiquer même des entailles pour mieux lier les fondations aux terrains; et, si ces fondations sont en maçonneries, le travail doit commencer par l'application d'une couche de béton, ou au moins de mortier hydraulique.

Figure 77 des planches.

Terrains de deuxième classe.

Une partie des observations précédentes s'applique aux terrains dits de

deuxième classe; mais de plus, pour ceux-ci, il est indispensable :

1° Que la charge soit répartie sur tous les points par une plate-forme, soit en bois, composée d'un ou plusieurs plans de bois croisés, soit en maçonnerie de libages ou de béton, d'une épaisseur convenablement réglée :

2° Que ces terrains soient encaissés par des parois autant que possible parallèles, ou au moins symétriquement convergentes à la direction de la résultante des efforts. Ainsi qu'il a déjà été dit plus haut, cette condition ne pourra pas quelquefois être satisfaite, et il faudra alors réserver une résistance spécialement opposée à la composante des forces qui sera parallèle à l'assiette des fondations. Cette résistance se trouvera presque toujours dans l'inertie et l'incompressibilité des zônes de terrain avoisinantes.

3° Que l'eau ne puisse pas traverser la base des constructions et en entrainer peu à peu les diverses particules.

L'encaissement des terrains incompressibles se fait; soit avec des lignes de pieux jointifs juxta-posés et même assemblés à rainures et languettes; ou avec des *palplanches* jointives (forts madriers de 10 à 20 centim. d'épaisseur et de 15 à 40° de largeur); ou en combinant, dans chaque parois, des pieux isolés et équidistants avec des palplanches jointives, ainsi qu'il sera dit pour les *batardeaux*. L'extrémité inférieure des pieux et palplanches, affilée au besoin, doit être munie de *sabots* en fer, et mieux en fonte, ou être au moins durcie au feu. On assemble ordinairement par panneaux les palplanches au nombre de 4 à 8, selon leur largeur, en les liant haut et bas par des cours horizontaux de *liernes*, avec lesquels elles sont boulonnées. On enfonce ces panneaux par les mêmes moyens que les pieux. Figures 78 des planches.

Terrains de troisième classe.

Les terrains de troisième classe s'ils étaient *homogènes*, d'une épaisseur uniforme *au-dessus* des couches inférieures résistantes, s'ils ne pouvaient pas être modifiés par le temps, seraient susceptibles d'être employés directement sans préparation préalable, si l'on avait soin :

1° De répartir la charge générale par de vastes plates-formes ou massifs en *bois* de fort échantillon, maçonnerie de libages ou de béton, et même en sable. L'étendue de la plate-forme, relativement à celle de l'assiette de l'ouvrage, dépendrait de la résistance permanente au minimum du terrain par unité superficielle.

2° De contenir l'enceinte de la fondation comme il a été dit pour les terrains de deuxième classe.

L'épaisseur des plates-formes ou massifs devrait au reste être calculée d'après l'étendue des fondations ainsi déterminée.

21

Les plates-formes en béton ont le grand avantage d'être exécutables sans batardeau, de former *avec le temps* des corrois imperméables; de répartir les charges sur tous les points du sol, mieux que ne le ferait une plate-forme en maçonnerie ordinaire; et de résister comme un seul bloc aux mouvements de glissement sur le sol, ou de pirouettement sur les arêtes.

Fondations sur sable. L'incompressibilité du sable pur, particulièrement de celui à *grains ronds*, et ses conditions particulières de résistance, déjà éprouvées dans les pavages des voies de communication sur formes en sable, sont exposées dans des articles insérés par M. *Huber Burnand*, dans la *Bibliothèque universelle de Genève* de 1829. Ces propriétés ont été reproduites dans les paragraphes 267, 268, 275 de l'ouvrage de M. Navier, déjà cité (*Résumé des leçons données à l'Ecole des ponts et chaussées*). Elles ont donné lieu à des essais en grand publiés par MM. les officiers du génie Moreau et Riel, dans le *Mémorial du génie*, et insérés par extraits dans les *Annales des ponts et chaussées* de 1835. Depuis lors un assez grand nombre de travaux exécutés sur sable ont prouvé que ce genre de fondations, dans des zônes *non traversées par l'eau*, résistait parfaitement sur de mauvais terrains hétérogènes, quand le massif de sable était d'une épaisseur suffisante, encaissé par du bois, de la maçonnerie ou de la terre, et qu'une plate-forme en bois ou en maçonnerie répartissait la charge supérieure. Mais si l'on avait à craindre des infiltrations *d'eaux vives dans le sable ou dans le terrain au-dessous*, il serait peut-être imprudent de se confier à ce moyen, à moins de contenir le sable par des parois de béton latérales et de fond. Le sable, dans ce cas, n'aurait guère que l'avantage d'économiser le béton.

Figures 79 des planches

Les divers modes exposés ci-dessus, pour les fondations sur les mauvais terrains, sont employés journellement dans les ports militaires et marchands pour les chantiers de construction de navires de guerre du second ordre et de navires du commerce, et même pour des édifices permanents.

*Fondations artificielles.*

Lorsque le terrain solide naturel est à une profondeur telle qu'on ne peut y asseoir les fondations sans des dépenses excessives en fouilles et épuisements, ou sans rencontrer des obstacles insurmontables, l'on a recours aux moyens d'art pour créer des fondations artificielles.

Les plus simples consistent à augmenter la résistance des mauvais terrains *superficiels*. On peut y parvenir dans quelques cas par la compression :

1° En chargeant temporairement les terrains d'un poids très-considérable, triple, par exemple, de la charge permanente; mais ce moyen conviendrait peu aux terrains doués de *quelque élasticité*, et n'offrirait aucune garantie s'ils étaient traversés par l'eau, qui sans cesse en altérerait la cohésion.

Quand on y a recours, il faut avoir soin d'élever les constructions *par parties*, de manière que le terrain comprimé reste chargé dans presque toute son étendue, et ne soit pas libre de réagir.

2° En employant pour la charge du paragraphe précédent des terres, pierrailles et moellons, qui expulsent les parties molles des mauvais terrains et s'y substituent. Il est prudent de commencer à charger les zônes centrales, en avançant vers le périmètre de l'enceinte, et de donner à cette enceinte une surface bien plus grande que celle de l'assiette de fondation.

On a essayé, mais sans succès, de substituer aux moyens précédents la compression du terrain *superficiel* à l'aide du battage : le choc produit peu d'effet, et ne détermine qu'un léger durcissement dans la dernière couche supérieure.

3° En recourant à un procédé qui remonte à une haute antiquité, et qui consiste à enfoncer dans le mauvais terrain, *en échiquier* et à des intervalles plus ou moins rapprochés, et, autant que possible, *parallèlement à la direction des charges supérieures*, une multitude de pieux en grume, mis en fiche *par le gros bout*. Le battage commence par ceux du périmètre de l'enceinte, et chemine ainsi des bords vers le centre : l'espace occupé par les pieux étant pris aux dépens du terrain, celui-ci, refoulé dans l'intervalle des pieux, est beaucoup plus dense. Dans les terrains vaseux d'Anvers et Flessingue, on a remarqué que le gonflement superficiel au-dessus du niveau primitif du sol, n'équivalait qu'à la moitié du cube des pieux. Figures 80 des planches.

Des expériences réitérées ont été faites au port de Lorient, dans un terrain de vase molle, d'une profondeur indéfinie, et sur des pieux de palées de ponts, rangés sur deux lignes parallèles, et battus par le gros bout. La résistance à l'enfoncement a été trouvée, au plus, de 700 kilog. par *mètre carré de surface périmétrique frottante* des pieux ; ainsi un pieu de 30 cent. de diamètre moyen et 8 mètres de longueur, ne portait dans un pareil terrain que 5,200 kilog., tandis que sur un terrain solide il aurait supporté 25,000 kilog.

On peut obtenir la même surface frottante totale, par un grand nombre de petits pieux ou un moindre nombre de pieux volumineux; et ces derniers peuvent être eux-mêmes d'un fort diamètre moyen, de 40 à 50 centim., et d'une petite longueur, 4 à 5 mèt. au plus; ou bien être d'un diamètre moyen de 20 à 30 cent., et de 8 à 9 mèt. de longueur.

Les surfaces frottantes croissant comme les diamètres, tandis que les cubes des pieux croissent comme les carrés de ces diamètres, le système des pieux minces exige moins de bois que celui des gros, indépendamment de leur moindre prix au mètre cube, et de la plus grande compression qu'ils produisent sur le terrain intermédiaire; mais la dépense pour la mise en fiche de ces petits pieux est plus forte.

Les pieux très-longs et très-minces ont sous ces divers rapports également quelques avantages; en outre, ils arrivent d'ordinaire à des couches de terrain plus résistantes; mais la compression du terrain intercalaire est moindre que quand les pieux sont d'un plus fort diamètre et moins longs.

Dans chaque localité il faudra faire des essais comparatifs.

On a dit ci-dessus que les pieux devaient être battus, autant que possible, parallèlement à la direction de la résultante des charges supérieures; cela n'est guères possible quand une partie de cette charge est permanente et l'autre éventuelle. En outre le battage de pieux inclinés à plus de 30° de la verticale, n'est guère praticable avec les appareils usités.

Quand on aura arrêté la direction de la fiche des pieux, on supposera que la résultante générale des forces soit décomposée en deux forces, l'une parallèle et l'autre perpendiculaire à cette direction, et c'est contre cette dernière qu'il faudra ensuite se prémunir.

Mais dans les terrains vaseux et tourbeux, d'une fluidité visqueuse, il est très-difficile de trouver un point d'appui contre cette composante de forces. On a vu des pilotis *de fondation de quai marcher et s'incliner en surplomb malgré le poids des maçonneries qu'ils portaient, et sous l'action de la poussée des vases pressées par les remblais intérieurs.*

On ne peut espérer prévenir ces effets que par les moyens suivants :

1° Enlever une couche épaisse de la surface du mauvais terrain, en avant de la fondation, et la remplacer par un terrain artificiel résistant, tel que des enrochements, du sable encaissé, ou même du béton.

Figures 81 des planches 2° Etablir en avant du rang extérieur des pieux, une parois en bois bien solidaire, engagée dans le terrain comme ces pieux et parallèlement à leur fiche, et qui répartirait l'effort de translation sur un plus grand

volume de vase ou tourbe : ce moyen n'a pas réussi avec des vases très-molles.

3° Accorer ou retenir la plate-forme des fondations à des points inébranlables par de forts arc-boutants extérieurs, ou par des tirants et ancrages à l'intérieur. Ce moyen, employé par M. Décessart aux quais de Rouen (voir les *OEuvres* de M. Décessart), n'est applicable qu'à quelques localités ; il a réussi dans divers travaux du port militaire de Lorient. Figures 83 des planches.

4° Draguer l'enceinte du pilotis, avant ou après le battage, et la remplir avec des enrochements ou du béton, dont l'inertie et le frottement résistent au déplacement, et qui remplissent à la fois les mêmes fonctions que les massifs et parois indiqués ci-dessus nos 1 et 2.

5° Empêcher le poids des remblais de comprimer la vase, en établissant en arrière de l'enceinte des fondations, une plate-forme sur pilotis, qui supporte les remblais, et former ces remblais eux-mêmes de maçonnerie de blocaille. Ce dernier moyen a complétement réussi au port militaire de Lorient. La plate-forme horizontale en question peut en effet s'enfoncer verticalement sans aucun inconvénient, jusqu'à ce qu'il y ait équilibre entre le poids des remblais et la résistance des couches *du fond* du terrain. Cette dernière est alors seule en jeu, et généralement elle est beaucoup plus grande que celle des couches superficielles. Figures 83 des planches.

*Fondations sur pilotis atteignant le terrain solide.*

Lorsqu'un pilotis peut atteindre le terrain résistant, on distingue ordinairement le cas où il est engagé sur toute sa longueur dans le terrain superficiel superposé au terrain résistant, et le cas où la fiche dans ce terrain n'est qu'une partie de la longueur des pieux. Ici, comme dans le cas précédent, *on dirige, autant que possible*, les *pieux parallèlement à la direction de la résultante générale des forces*; et si cela n'est pas praticable, l'on a recours contre les efforts perpendiculaires à la direction des pieux, à l'un des moyens indiqués ci-dessus.

Le nombre et l'espacement des pieux doivent être réglés suivant leurs dimensions et le maximum de charge que la fondation aura à supporter dans ses diverses zônes. Bien que le terrain intermédiaire à la fiche des pieux, les rende beaucoup plus résistants que s'ils étaient appuyés simplement sur leur base (on a donné plus haut la mesure du frottement latéral minimum); cependant on n'en tient pas compte ordinairement, et l'on

applique à toute la longueur des pilotis les formules générales de résistance des bois chargés debout.

Les pieux sont d'ailleurs, dans la plupart des cas, d'un diamètre ou équarrissage moyen du $\frac{1}{20}$ ou $\frac{1}{25}$ de la longueur, et résistent comme à l'écrasement.

Dans les pieux de fondation des grands ponts, l'espacement des pieux de milieu en milieu est réglé ordinairement à 80 centim., et répond à une charge d'environ 25,000 kilog. Cette règle a été donnée par Peyronnet. D'après les expériences en grand faites au Havre, une pièce de bois de $0^m,24$ de diamètre, qui dépassait d'environ 1 mètre le niveau du terrain où elle était enfoncée, avait rompu en s'écrasant sous un poids de 54,343 kilog. C'était aussi la charge de chaque pilot d'une des arches du pont de Tours. Toutefois ce pont avait croulé en 1777, précisément par la rupture de plusieurs pilotis.

Le but d'un pilotis étant d'arriver le plus facilement possible au terrain résistant, il est évident que, par opposition aux *pilotis de compression* de terrain, il faut, à moins de sujétions spéciales, commencer les travaux par les pieux des zônes centrales des fondations, et en marchant progressivement vers le périmètre; et que, si des draguages doivent être effectués, il doivent précéder le battage du pilotis.

L'expérience a fait connaître que ces draguages étaient indispensables dans des terrains graveleux, où les pieux éprouvent des frottements et des obstacles à leur pénétration *tels*, que pour obtenir un approfondissement ultérieur, il faut à la surface du sol draguer d'une hauteur égale à cet approfondissement.

Dans les terrains glaiseux élastiques, et même sablonneux, on est même forcé de mettre les pieux en fiche par le *gros bout* pour empêcher le sol de les repousser de bas en haut.

Les bois qui n'ont pas une longueur suffisante sont *entés*, c'est-à-dire qu'on les réunit bout à bout; dans ce cas les gros bouts des pièces à réunir sont adossés dans l'enture. Cette enture s'opère au moyen de deux entailles. L'assemblage est fortifié souvent par des lattes longitudinales extérieures, en bois ou en fer, et toujours par deux *frettes simples* ou *à charnières*. Les frettes sont *simples* lorsque l'enture se prépare à loisir avant la mise en fiche, et pour une profondeur connue et déterminée; elles sont *à charnières* lorsqu'elles se placent éventuellement après l'enfoncement.

Figures 84 des planches.

Pour l'économie des bois, il est utile, suivant les localités et les terrains à

traverser, de faire l'enture tantôt avant, tantôt après le battage, c'est-à-dire par le bas ou par le haut. Toutefois l'enture par le haut se disloque facilement par le choc, et dépense ainsi en pure perte une partie de la force motrice.

La tête des pieux est coupée carrément avec chanfrein au pourtour, afin qu'elle n'éclate pas dans le choc : on la cercle aussi d'une frette en fer, qu'on enlève après le battage.

Lorsque le terrain à traverser est ferme, parsemé de cailloutis, ou en remblais de débris divers, l'on arme la pointe des pieux de sabots, ronds si les pieux sont isolés, et en biseau s'ils sont jointifs. Ces sabots, du poids d'environ 12 kilog., qu'on exécutait autrefois en fer forgé à plusieurs branches, sont maintenant, avec grande économie et plus grande efficacité sous le rapport de la pénétration, exécutés en fonte de fer coulée autour d'une cheville centrale en fer forgé. Figures 85 des planches.

On a proposé, pour économiser le bois des pilotis, de le remplacer par du béton ou par du sable. Le premier moyen est usité dans l'Inde, en ce sens que les fondations des ouvrages sont portées par des piliers verticaux, isolés et équidistants en maçonnerie. Le second moyen a été essayé à Bayonne. (Voir les articles des *Annales des ponts et chaussées* déjà cités et relatifs à l'emploi du sable dans les fondations.) Figures 86 des planches.

Mais l'emploi de ces moyens ne peut guère convenir que lorsque les pieux de *forage* traversent des terrains d'où il est facile de les arracher ; et que cette main-d'œuvre d'*arrachage*, augmentée de la dépense du béton et du sable, n'est pas plus coûteuse que la valeur d'un pieu ordinaire en bois ; enfin lorsque l'on a des craintes pour la durée d'un pilotis permanent en bois.

*Du battage des pieux.*

L'enfoncement des pilotis, pieux et palplanches s'opère par la percussion d'un poids nommé *mouton*, qu'on laisse tomber après l'avoir élevé à une certaine hauteur. Quand les pieux sont courts et grêles, on se sert d'un billot de bois, armé de bras, et soulevé par 4 à 6 hommes.

On appelle *volée* une suite de coups se succédant à courts intervalles, et au terme de laquelle il y a un repos de quelques minutes. Ce repos est favorable à l'enfoncement du pieu, en ce qu'il fait cesser le mouvement de trépidation qui serait un obstacle à l'effet de la volée suivante.

La volée ordinaire est de 30 coups quand le mouton n'est élevé qu'à $1^{m},20$.

Quelquefois cependant elle est de 60 coups, quand le pieu est parvenu à peu près au terrain résistant. Par suite du mode d'élévation ordinaire du mouton à $1^m,20$, on appelle *volées à la tiraude*, les volées de battage à cette hauteur.

Quand le mouton est élevé à de plus grandes hauteurs, de $2^m,50$ à 5 mèt., les volées, dites alors *volées au déclic*, ne sont que de 15 et même de 10 coups. Dans les appareils de battage à grande élévation du mouton, le nombre des coups de mouton *dans un temps* donné est beaucoup moindre; mais le mouton agit pendant quelques secondes par son poids après avoir agi par son choc.

On appelle *refus* la quantité dont le pieu a pénétré dans le terrain pendant une volée. Ce refus dépend à la fois de la force du choc et de la résistance du terrain. C'est en quelque sorte l'effet utile du choc. Il représente, à hauteur égale d'élévation du mouton, pour les terrains résistants, *où le poids de la pièce de bois est négligeable*, les accroissements progressifs des résistances, tant du fond que des frottements latéraux.

Le mode de percussion à la *tiraude* ou au *déclic*, un poids déterminé du mouton, ne peuvent pas être employés indifféremment pour tous les terrains, et suivant qu'il faudra seulement procurer une fiche déterminée aux pieux, ou les pousser jusqu'à ce qu'ils s'arrêtent; enfin, suivant qu'il s'agira de pieux de faible dimension ou de pieux volumineux. Quelquefois même les deux modes devront être appliqués successivement aux mêmes pieux.

S'il s'agissait, par exemple, de faire traverser un terrain argileux et compact par des pieux volumineux d'une grande longueur de fiche; un petit mouton élevé, même à 5 mètres de hauteur, ne produirait presque pas d'effet; il faudrait donc recourir dans ce cas à un poids considérable, et à la plus grande vitesse possible de chute, par une grande élévation d'un mouton.

Si, au contraire, il y avait à enfoncer des pieux très-effilés à travers un terrain mou, et seulement pour leur donner une fiche déterminée; l'emploi initial d'un fort mouton, même à une faible hauteur, serait défectueux, en ce qu'il s'opposerait à toute précision et à toute régularité dans le battage, et qu'on aurait à effectuer à de trop courts intervalles, les déplacements de l'appareil de battage.

Enfin, s'il s'agissait d'enfoncer des pieux jusqu'au solide, mais à travers un terrain dont les couches superficielles seraient molles, il y aurait, sur

le même pieu, à employer successivement le battage à la tirande puis celui au déclic.

On a remarqué dans quelques circonstances, qu'une pièce qui n'enfonçait plus sous le choc d'un mouton pesant, tombant d'une grande hauteur, recommençait à pénétrer dans le terrain lorsqu'on la rebattait avec un mouton plus léger, élevé moins haut. L'explication de cette anomalie apparente est dans l'accroissement de réaction que développe une force vive exagérée.

Enfin, en admettant que, sous le rapport de la dépense, le battage à la tiraude et celui au déclic fussent équivalents, le premier procure une plus grande rapidité d'exécution que le second, au moins dans les appareils de battage en usage jusqu'à ce jour.

Ainsi, dans chaque cas particulier, et surtout pour le battage de pilotis considérables, il faut se livrer à des essais pour constater le système de battage le plus approprié au terrain, et qui satisfasse de plus aux conditions de durée totale du travail, eu égard au nombre d'appareils disponibles.

Lorsque la profondeur du terrain solide sera connue, ces mêmes essais indiqueront le refus, qui correspondra à une résistance équivalant à celles réunies du terrain et du frottement latéral contre le pourtour des pieux. L'expérience et la pratique des grands travaux ont conduit à considérer un pieu comme arrivé à un terrain résistant susceptible de porter une charge permanente de 25,000 kilog. sur chaque pieu, quand ce pieu n'enfonçait plus que de $0^{m},01$ par volée de 10 coups d'un mouton pesant 600 kil., élevé à $3^{m},60$ de hauteur; ou par volée de 30 coups d'un mouton de même poids élevé à la tiraude à $1^{m},20$ de hauteur.

Mais il arrive souvent qu'on n'a pas besoin d'une résistance aussi grande, et alors on regarde les pénétrations du pieu par volée, comme proportionnelles aux résistances des terrains; en sorte qu'on se contenterait d'un refus de $0^{m},02$ par volée pour des pieux qui n'auraient à supporter qu'un effort de la moitié de 25,000 kilog.; et de $0^{m},05$ par volée si l'effort n'était que de 5,000 kil.; les pieux ayant d'ailleurs même grosseur et longueur de fiche. Si cette fiche et cette grosseur variaient, il n'y aurait que l'expérience qui pourrait faire connaître à quelle charge permanente correspondrait un refus déterminé.

Ce n'est pas ici le lieu de décrire les divers appareils de percussion employés sur les travaux. Seulement on fera observer que ces appareils

Des appareils et forces motrices pour le battage.

doivent être faciles à déplacer, être à volonté appropriés pour le battage à la tiraude ou au déclic; qu'il faut y éviter le plus possible les frottements et autres résistances dans l'ascension, et surtout dans la descente du mouton, puisqu'ils diminueraient la vitesse du choc et l'effet utile; que, par ces considérations, il faut donner aux *poulies de renvoi* et *treuils les plus grands diamètres que possible*, rendre dans la tiraude les tractions aussi les moins obliques que possible, et dans le déclic éviter que le mouton ne traîne rien après lui dans sa chute. Les figures 87 des planches représentent quelques-uns de ces appareils.

Figures 87 des planches.

Lorsque la tête d'un pieu est arrivée plus bas que le point où le mouton peut descendre, on est forcé de se servir de *pousse-pieux*, qui transmettent le choc du mouton aux pieux; mais cet intermédiaire dépense en pure perte une partie de la force motrice, et il faut en retarder l'emploi autant qu'il est possible.

La préférence à donner, toutes choses égales d'ailleurs, à tel moteur sur tel autre, dépend des circonstances locales, des sujétions spéciales à chaque travail, de son importance totale, de la plus ou moins grande rapidité d'exécution, des dépenses comparatives y compris les frais d'installation, en un mot, de considérations plutôt *administratives* que *techniques*.

La force de l'homme a été employée pour les sonnettes à la tiraude, en prenant pour règle que chaque manœuvre peut être chargé d'un effort permanent de 15 à 20 kilog. avec la vitesse ordinaire de 4',5 par volée de 30 coups, à $1^m,20$ de hauteur (y compris les repos).

On a employé pour le *déclic* les bœufs, les chevaux, et même les machines à vapeur. Mais les moteurs autres que l'homme ont l'inconvénient de ne pouvoir, comme lui, se déplacer facilement avec l'appareil de battage; ou bien, s'ils restent au même point, les transmissions de mouvement de ce point à l'*emplacement variable* de l'appareil de battage sont fort compliquées.

Figures 88 des planches.

On peut voir dans les œuvres de Peyronnet la description du battage à déclic fait par le mouvement rectiligne alternatif de chevaux cheminant en ligne droite. Au port militaire de Lorient on a employé avec succès, pour le battage de grands alignements de pieux, une sonnette à déclic, mue par un manége amovible. On s'est servi de la force motrice des cours d'eau, dans des battages de pilotis de fondations de grands ponts.

Figures 89 des planches.

Dans les travaux de quelque importance, on prescrit de tenir un registre du battage des pieux de fondation; d'y annoter le numéro d'emplacement de chacun et ses dimensions; le refus qu'il a manifesté après chaque volée à

la tiraude et au déclic; le nombre total des volées; la fiche totale et le refus définitif. De plus, pour chaque volée, on indique le poids et l'élévation du mouton. Ces documents font connaître la disposition souterraine des couches du terrain, et indépendamment des renseignements qu'ils fournissent sur les dépenses du battage, ils indiquent les causes de certains tassements qui se manifestent quelquefois après la construction.

*Des grillages de fondation en général.*

Les pilots ont été battus dans l'enceinte du batardeau : le sol vaseux ou peu résistant, et fatigué par l'opération du battage, a été enlevé sur environ 40 à 50 centi. de profondeur, et remplacé par une couche horizontale de terre argileuse, ou mieux encore par une maçonnerie à mortier hydraulique; celle-ci affleure la base des tenons que l'on prépare sur la tête de chaque pilot : ainsi tout est disposé pour recevoir le grillage, sur lequel doit porter la première assise de fondation.

Le grillage est une espèce de châssis en charpente, formé de pièces assemblées à *mi-bois*.

Il est évident que, lorsque le terrain est assez résistant vers la surface du sol, ou, lorsqu'étant peu compressible, l'enceinte de la fondation est renfermée par des pilots ou palplanches jointives; le grillage se pose immédiatement par encastrement dans le terrain. Cette circonstance n'apporte aucun changement à sa construction.

Mais lorsqu'un grillage doit être établi sur un pilotis ; si, par suite de l'irrégularité souvent inévitable du battage, quelques-uns des pilots se trouvent *hors ligne*, on supprime le tenon de ces pilots, et le grillage repose alors sur eux par embrèvement. Lorsque leur écartement est trop considérable, la pièce du grillage porte sur une fourrure appliquée au pilot, et qui lui est attachée au moyen d'un ou deux boulons.

Les mortaises, dans les pièces qui forment le grillage, ne se tracent qu'après les avoir présentées sur place : cette précaution est indispensable.

La pièce nommée *chapeau* est celle qui forme le cadre du grillage. Les *longuerines* sont les pièces posées parallèlement à la longueur de l'ouvrage; et les *traversines* sont celles qui lui sont perpendiculaires. Ces pièces s'assemblent par entailles et à mi-bois, et les chapeaux se prolongent au delà de la rencontre de chaque angle du polygone d'environ $0^{m},32$.

Lorsque la longueur d'un côté du polygone exige que l'on ajoute plusieurs pièces pour la former, elles s'assemblent à mi-bois et à recouvrement.

Si l'on établit un plancher de madriers ou une plate-forme sur le grillage, on peut se dispenser d'employer des longuerines. Les traversines se nomment alors *racineaux :* ils sont moins épais que le chapeau, de toute l'épaisseur de la plate-forme qui affleure le chapeau, et s'assemblent avec lui au moyen d'une *rainure.*

Lorsque l'on forme une enceinte de palplanches, elles ne se battent qu'après la pose des chapeaux, et contre leur face verticale *intérieure.*

La plate-forme qui recouvre le grillage se fait en madriers d'environ 5 centimètres d'épaisseur; ils sont posés jointivement et perpendiculairement aux racineaux, auxquels les madriers sont fixés par des chevilles en fer.

Au lieu d'établir une masse de maçonnerie au-dessous du grillage, on se contente quelquefois, ainsi qu'on l'a dit, de former ce massif avec de l'argile, et, dans ce cas, on emploie la même substance pour remplir les cases formées par le grillage : cette méthode est bonne lorsqu'on superpose une plate-forme au grillage. Le remplissage des cases, qu'il soit fait en maçonnerie ou avec de l'argile, doit s'affleurer avec le dessous du grillage pour recevoir la plate-forme immédiatement et sans vide.

Quelques Ingénieurs désapprouvent l'emploi des plates-formes, surtout lorsque les cases du grillage sont garnies en maçonnerie; c'est suivant eux un corps intermédiaire entre deux maçonneries, dont il empêche la liaison. De plus, il facilite le glissement, auquel les masses sont sollicitées par les poussées horizontales qui s'exercent contre elles.

On oppose à ces motifs, en faveur des plates-formes, le cas possible d'affouillement sous le massif de fondations, et la ruine inévitable de l'édifice si la plate-forme ne garantissait pas le noyau de maçonnerie de l'effet de ces affouillements intérieurs; ces dernières considérations déterminent ordinairement l'adoption des plates-formes, malgré l'augmentation des dépenses qu'elles occasionnent.

On peut former une plate-forme à moindres frais en se bornant à remplir en madriers les intervalles formés par les longuerines. Cette méthode n'a pas les inconvénients de faciliter le glissement des masses, puisque l'inégalité des épaisseurs des longrines et des madriers forme des ressauts; mais elle a un inconvénient, c'est de ne pas offrir la même facilité pour le tracé de l'ouvrage.

La figure 90 des planches indique le profil de toutes les parties qui constituent un grillage avec plate-forme prête à recevoir une fondation. Figures 90 des planches.

L'exécution des fondations des piles et culées, celle de radiers généraux, en maçonneries superposées au terrain naturel ou dragué, exigent l'emploi de batardeaux submersibles ou insubmersibles ; mais les fondations et radiers généraux en béton, en pierres perdues, en enrochements, en fascinages, présentent l'avantage de pouvoir être exécutés directement sous l'eau.

FIN DE LA PREMIÈRE PARTIE

RELATIVE AUX MATÉRIAUX ET AUX FONDATIONS EN GÉNÉRAL.

# DEUXIÈME PARTIE.

**APPLICATIONS A LA CONSTRUCTION DES ROUTES ET DES CHEMINS DE FER.**

## RÉSUMÉ DE LA QUATORZIÈME LEÇON.

CLASSEMENT, DIMENSIONS ET DÉPENDANCES DES ROUTES. — CONSTITUTION ET CONFIGURATION. — OUVRAGES ACCESSOIRES ET D'EMBELLISSEMENT. — PROFIL DES ROUTES EN GÉNÉRAL. — CHAUSSÉES EN PAVÉ. — CHAUSSÉES EN EMPIERREMENT.

*Classement, dimensions et dépendances des routes.*

Les routes étaient divisées en classes relativement à leur degré d'importance.

Dans chacune de ces classes elles avaient des largeurs différentes.

1re classe, 20 mètres de largeur,
2e classe, de 16 mèt.
3e classe, de 14 à 12 mèt.
} Comprenant les grandes routes proprement dites.

4e classe, de 7 à 8 mèt Elle était relative aux chemins dits communaux et vicinaux.

Après avoir anciennement déterminé ces dimensions, la législation s'était de nouveau occupée de la largeur des routes qui, dans ce premier système, était évidemment trop considérable.

Un arrêt du conseil, de 1776, les déterminait ainsi :

1re classe, 14 mètres de largeur.

2e classe, 12 mèt.

3e classe, 10 met.

4e classe, 8 mèt.

L'on doit observer que ces dimensions en largeur paraissent trop faibles pour les routes de première classe ; mais celles des seconde, troisième et quatrième classes sont évidemment suffisantes.

La détermination des largeurs des diverses parties qui constituent une route, et de leurs rapports entre elles, d'après ce qui a paru le plus convenable, font l'objet du tableau suivant :

| CLASSES. | LARGEUR de chaque fossé à la crête (4). | LARGEUR de chaque accotement. | LARGEUR de la chaussée centrale. | LARGEUR totale non compris les fossés. | OBSERVATIONS. |
|---|---|---|---|---|---|
| 1re | 2m | 3m,5 | 7m | 14m (1) | (1) Aux abords des grandes villes la largeur totale est portée quelquefois à 20 et 25 mèt., et même au delà.<br>(2) On a souvent réduit cette largeur à 6 mètres.<br>(3) On a réduit souvent cette largeur à 5 mètres, en ménageant des gares de distance en distance.<br>(4) Les fossés qui ne servent qu'à l'écoulement des eaux peuvent être plus étroits. |
| 2e | 2 | 3 ,0 | 6 | 12 | |
| 3e | 1 ¾ | 2 ,5 | 5,5 | 10.5 | |
| 4e | 1,5 | 2m,5 à 2m | 5 à 4m | 10 à 8m (2) | |
| 5e | 1 à 0m,8 | 2m à 1m,5 | 4 à 3m | 8 à 6m (3) | |

Les routes de première classe sont celles qui, partant de la capitale, traversent le territoire français, et communiquent sans interruption avec les villes principales des pays étrangers; elles sont dites *royales*, sont entretenues aux frais de l'état.

Celles de deuxième classe partent du centre du royaume et aboutissent à un chef-lieu de département; elles sont également dites royales, et entretenues aux frais de l'état.

Celles de troisième classe mettent en relation plusieurs départements; elles sont également dites royales; mais quelquefois les départements concourent à leur entretien.

Les communications de chef-lieu à chef-lieu; d'une grande commune à une autre, et de cette dernière à une route de première classe; constituent les routes de quatrième classe, dites routes *départementales*, et entretenues au frais des départements.

Enfin la cinquième classe comprend à la fois les chemins de communications entre plusieurs communes, dits chemins de *grande vicinalité*, entretenus aux frais des départements et des communes ; et les chemins *vicinaux* ordinaires, entièrement à la charge de ces communes, dont ils relient les diverses parties.

Au-dessous de cette cinquième classe sont les chemins *ruraux*, suffisamment définis par leur nom.

Récemment on a construit dans quelques départements de l'Ouest des routes dites *stratégiques*, *créées* dans un but militaire et politique, et qui seront entretenues en commun par l'état et les départements.

Les routes de toute dénomination en France, sont affranchies du péage qui se perçoit à des barrières échelonnées en Angleterre et en Allemagne. Toutefois, récemment on a établi des péages au bas de rampes très-rapides qui ont été adoucies et qui exigeaient des chevaux de renfort.

On renvoie, pour plus de détails sur la classification administrative des routes, au décret de décembre 1811, aux lois de 1835 sur les chemins vicinaux, et aux lois de création des routes stratégiques de 1833 et 1834.

L'économie dans les remblais des routes placées dans un pays de montagnes, les traversées de villes et villages existants, et autres circonstances de localités, exigent souvent des diminutions de largeur dans les profils des quatre premières classes; de là résulte la nécessité de diviser une même classe de route en différents ordres.

*Configuration et constitution des routes.*

Les parties constitutives d'une route sont : *chaussée solide* au milieu, un *accottement* de chaque côté, *talus* de déblai ou remblai qui soutiennent l'accottement; enfin *fossés*, pour l'écoulement des eaux, et ne devant servir que temporairement de *réservoirs*.

Lorsque des circonstances de localité obligent de diminuer la largeur d'une route; la réduction a ordinairement lieu, sur les accottements et les fossés seulement; la largeur de la chaussée dans tous les cas ne peut être moindre de 18 pieds (environ 6 mètres), afin de laisser un passage commode à deux voitures qui marchent de front ou se croisent.

La chaussée est construite en pierres, en pavés, en empierrement ou quelquefois *en bois*; cette partie étant destinée au roulage des voitures, doit être très-solide.

Les Romains construisaient leurs grandes voies de communication par couches alternatives de diverses maçonneries assimilables au béton. La couche superficielle était en grandes pierres plates. Le tout avait au moins 1 mètre de hauteur. La chaussée au milieu avait $4^m,50$ à $4^m,75$ de largeur, et était bordée de deux banquettes, chacune de $0^m,60$ de largeur, et quelquefois d'accottements de $2^m,50$ à 3 mèt. de largeur. Il reste des débris de ces routes en Italie, dans le midi de la France, et suivant quelques grands alignements qui divergeaient tous de Paris.

Figures 91 des planches.

Dans les contrées comme la Pologne et une partie de la Russie, et des Etats-Unis, où la pierre manque et où le bois est en abondance et ne coûte

Routes en bois.

presque que les frais d'abattage, on a formé des routes avec des tiges d'arbres placées côte à côte, ou à distance, transversalement ou longitudinalement à l'axe de la route; quelquefois en deux plans de bois croisés; et l'on a recouvert le tout de sable ou d'un plancher en madriers.

Dans les landes de Gascogne, on avait employé d'abord un système composé au fond de trois cours de longuerines, croisés par des traversines jointives à la surface. On fut forcé ensuite de réunir les abouts de ces dernières avec les cours de longuerines de rive, par des cours longitudinaux de ventrières faisant l'office de *moises*. Cette chaussée était raboteuse, et a été remplacée progressivement par une chaussée pavée. Figures 92 des planches.

Les accottements sont ordinairement en terre; ils sont particulièrement destinés au voyageur à pied : dans la belle saison ils offrent aussi aux voitures un roulage doux et suffisamment solide; *sous ce rapport* les accottements sont conservateurs de la chaussée qu'ils suppléent. Ils sont soutenus par les talus des remblais lorsque la route est *en levée*, ou par les talus des fossés lorsqu'elle est en déblai, c'est-à-dire lorsque la surface de la route est établie au-dessous du niveau du sol naturel du terrain.

L'aire supérieure de la chaussée présente presque toujours une surface convexe d'une plus ou moins grande courbure, selon que l'espèce de construction adoptée l'exige. Le but de cette courbure est de procurer de l'écoulement aux eaux pluviales de part et d'autre de la route. Cette condition essentielle d'écoulement oblige, autant que cela est possible, de tenir le sol de la route plus élevé que le terrain naturel; mais lorsque cette disposition, qui est la plus simple, et ordinairement la plus économique, ne peut avoir lieu, on y supplée au moyen de deux fossés.

Cette même considération d'un facile écoulement des eaux de la chaussée, exige, lorsqu'il n'y a pas de *trottoirs* pour les piétons, que les accottements soient inclinés vers l'arête du talus de la levée ou vers le fossé. Cette inclinaison ou pente en travers est déterminée par la nature des terres, et surtout par la pente de la route, suivant son axe longitudinal. Celle-ci doit être autant que possible moindre que celle de l'accottement, afin que les eaux ne soient point sollicitées à courir le long de la route.

Il y a quelques circonstances où toute la largeur de la route est construite comme une chaussée; un fond solide et une grande abondance de graviers appellent cette méthode de construction. Quelques départements du Midi, et l'Angleterre surtout, en fournissent des exemples. Beaucoup Figures 93 des planches.

d'Ingénieurs sont même d'opinion que les accottements en terre, nuisent plus qu'ils ne servent, et qu'il serait préférable de rétrécir la largeur de la route en augmentant celle de la chaussée ; et même d'étendre celle-ci sur toute la largeur de la voie. Toutefois, dans les descentes rapides des routes, il peut paraître préférable de conserver les accottements, parce que les voituriers y enraient de préférence, et qu'il vaut mieux exposer les accottements que la chaussée à être sillonnés profondément par cette manœuvre.

Tel est sommairement le profil transversal ordinaire d'une route; l'on y reviendra lorsque l'on traitera plus particulièrement de la construction des routes.

*Ouvrages accessoires et d'embellissement des routes.*

Les ouvrages accessoires aux routes, et embellissements consistent : en trottoirs pour les piétons, en *parapets* sur les routes en relief; en plantations, bornes milliaires, poteaux indicateurs; on y construit aussi des fontaines, des abreuvoirs et des bancs de repos.

Trottoirs. Les trottoirs pour les piétons; de 2$^m$,50 de largeur au plus, élevés de 30 à 40 centim. au-dessus du sol de la route, sont indispensables aux approches et dans les traversées des villes et bourgs. Les parapets sur les bords des routes en relief, sont d'une haute importance pour prévenir les accidents, et sous ce rapport la France est bien en arrière des autres pays. Quelquefois des haies en tiennent lieu.

Les parapets sur les rives des routes consistent : ou en bornes équidistantes de bois ou de pierre; ou en parois continues de bois ou de maçonnerie; ou en une simple levée de terres, qu'on fait alors au couronnement, d'une largeur telle qu'elle puisse servir de trottoir. Les parapets sont indispensables dans les tournants des routes en relief.

Plantations. Les plantations embellissent les routes; elles procurent de l'ombre pendant l'été aux voyageurs, et leur servent de guides, soit dans les plaines exposées aux inondations, soit dans les pays de montagnes, où les routes et les précipices qui les bordent disparaissent souvent sous les neiges.

Dans la plupart des routes, les arbres sont plantés sur le bord extérieur des fossés, ou même dans la ligne du milieu du fossé, comme aux abords de Paris, malgré les inconvénients évidents de cette dernière disposition pour l'écoulement transversal et longitudinal des eaux pluviales et de sources.

L'on avait pensé qu'il était plus avantageux, pour les routes de première classe, de placer les arbres sur le bord extérieur de l'accottement : on espérait, qu'avec les soins nécessaires pour leur conservation, ils réussiraient mieux que ceux plantés dans les champs au delà du fossé, où la charrue du laboureur les endommageait souvent. Mais les dégradations commises par les voituriers et les piétons ne pouvaient être prévenues ; d'ailleurs, si dans cette situation les arbres limitent mieux la portion viable de la route et s'opposent plus efficacement aux accidents, ils entretiennent aussi plus d'humidité dans les accottements.

On doit choisir pour ces plantations les espèces d'arbres qui conviennent le mieux au terrain, et qui produisent un bois utile, tels que le chêne, le hêtre, l'orme, le frêne, le pin, le peuplier, etc. ; il faut surtout rejeter les arbres à fruits : leurs produits les exposent à être endommagés.

Si les arbres sont d'une espèce qui s'épanouit beaucoup, dans ses branches, il faut augmenter leur espacement, afin de ne pas nuire au prompt assèchement de la route après les pluies, et de laisser un libre passage aux rayons solaires et aux courants d'air. Deux notices insérées dans les *Annales des ponts et chaussées* de 1831 donnent des détails très-intéressants sur les plantations.

Si les arbres convenablement élevés et espacés, sont utiles et agréables sur les bords des routes, il n'en est pas de même des haies continues, souvent implantées sur des hautes levées en terre, qui, en Bretagne, Basse-Normandie, Vendée et autres contrées, bordent les voies de communication. Outre les facilités qu'elles donnent aux malfaiteurs, elles empêchent la ventilation par leurs racines, entretiennent une humidité pernicieuse, et empêchent l'écoulement ou l'infiltration des eaux pluviales des fossés.

Les bois et forêts, qui dans d'autres contrées, s'étendent jusques au bord des routes, sont bien plus dangereux et préjudiciables encore ; aussi les anciennes ordonnances prescrivaient de laisser une langue de terrain *à nud* d'au moins 20 mètres de largeur entre le bord des routes et la lisière des forêts.

Les bornes milliaires anciennes étaient placées de mille en mille toises ; dans le nouveau système des mesures, elles sont, ou seront successivement remplacées par des bornes kilométriques. Chaque dixième, plus grande que les autres, indique un *myriamètre*, dénomination adoptée

Bornes et poteaux indicateurs.

pour l'unité de mesure des routes : elle comprend une longueur d'environ deux lieues et demie de 2,000 toises (1900 mètres).

Ces bornes sont des repères très-utiles pour désigner l'emplacement des opérations relatives à l'entretien des routes; elles ont d'ailleurs l'avantage d'indiquer au voyageur l'espace qu'il a parcouru et celui qui lui reste à faire.

Les poteaux indicateurs ne sont pas moins utiles, et l'on doit en placer à tous les points où une route s'embranche sur une autre : ils font cesser l'incertitude du voyageur, et l'empêchent de s'égarer en lui indiquant la route qu'il doit tenir.

A ces utiles accessoires, on doit encore ajouter, toutes les fois que la nature et les localités s'y prêtent, des fontaines et des abreuvoirs : l'on place ces ouvrages sur l'un des bords de la route. Ces monuments sont des témoignages de la sollicitude du gouvernement; les Romains en ont laissé de nombreux et magnifiques exemples; l'on doit les imiter en donnant aux routes, non-seulement la solidité nécessaire au genre de service auquel elles sont destinées, mais encore en leur procurant les embellissements et les commodités que réclame l'utilité publique.

L'encombrement que les dépôts de matériaux pour les réparations des routes occasionnent sur les accottements, les entraves que ces dépôts apportent à l'écoulement des eaux pluviales, ont déterminé quelques Ingénieurs à leur destiner des élargissements équidistants sur l'une ou sur les deux rives de la route.

Figures 94 des planches.

*Système de Construction des Routes.*

Après avoir indiqué les diverses parties qui composent l'ensemble d'une route, l'on va exposer les détails de sa construction, et donner quelques définitions des expressions adoptées dans leur construction.

On entend par *pente* ou *rampe* l'inclinaison d'une droite au-dessus ou au-dessous de l'horizontale; ainsi que l'expression l'indique, la pente descend et la rampe monte. Mais pour éviter, dans les projets, toute équivoque à cet égard, on est convenu de désigner toujours les pentes ou rampes en allant de la gauche vers la droite. La tangente de l'angle d'inclinaison, considérée dans un cercle qui a l'unité pour rayon, est la mesure de la rampe ou de la pente.

*Déblai*, c'est ce qui résulte de l'opération par laquelle on enlève la portion du terrain naturel qui se trouve supérieure à une ligne du projet; *remblai*, c'est la masse de terre qu'on rapporte sur le sol naturel pour lui donner le relief nécessaire à l'exécution des projets.

### *Profil des routes en général.*

Le profil en travers d'une route est une figure discontinue qui rend compte de la manière d'être de la chaussée et de toutes les parties qui composent l'ensemble de la route.

Pour tracer le profil ordinaire d'une route, on forme un triangle isoscèle, dont la hauteur est à la base dans le rapport relatif à la pente transversale qu'on veut donner à la route pour l'écoulement des eaux. Figures 95 des planches. Dans les cas ordinaires ce rapport est au plus le dixième de la demi-largeur de la route; le minimum est de $\frac{1}{24}$, particulièrement pour les chaussées pavées. Portant ensuite sur les côtés du triangle la largeur de la chaussée, mesurée sur la base; par ces points et par le sommet du triangle, on fait passer un arc de cercle qui exprimera la convexité de la chaussée; et ce qui restera des deux côtés du triangle formera chacun des accottements.

Pour compléter le profil de la route, il ne s'agit plus que d'attacher aux extrémités de la figure les talus de remblai, si c'est une levée, ou les fossés, si la route est en déblai.

Il est un autre profil qui s'adapte aux routes en plaines et en montagnes, il a la propriété de reporter les roues des voitures sur les chaussées. On Figures 96 des planches. l'appelle *profil à revers*. Dans ce profil les accottements s'inclinent en sens contraire sur la chaussée; mais cette disposition, si elle permet d'épargner les fossés riverains dans les rampes et pentes, exige d'un autre côté qu'on pave au moins sur $0^m,90$ à 1 mètre de largeur de chaque côté des deux rigoles ainsi pratiquées à droite et à gauche de la chaussée.

Dans les pays de montagnes, outre les deux profils qu'on vient d'indiquer, il en est d'autres assez fréquemment employés.

Le premier se nomme *profil en revers*. Il diffère des précédents en ce que la surface des accottements et de la chaussée au lieu d'être en arc de cercle, Figures 97 des planches ne forme qu'un seul plan dont l'inclinaison transversale porte du côté de l'escarpement du terrain Il n'y a alors qu'un seul fossé, qu'on saigne de distance en distance par des *cassis* ou *aqueducs*. Ce profil convient parti-

culièrement dans les tournants en relief des remblais, parce qu'il éloigne les voitures du bord extérieur.

Figures 98 des planches. Le second *profil* dit *en creux* substitue à une chaussée convexe une chaussée concave, vers laquelle les accottements s'inclinent. Cette disposition est vicieuse, d'abord parce qu'elle exige presque impérieusement le pavage intégral de la chaussée, et qu'elle détermine fréquemment des accidents en cas de rencontre de deux voitures, surtout dans les temps de neige et de gelée, et lorsque la pente longitudinale de la route est forte. Elle ne saurait donc être admise que dans les rétrécissements forcés des routes. Les rues étroites des villes étaient pavées jusqu'à ce jour en profil creux; l'on y substitue aujourd'hui à Paris des chaussées bombées avec trottoirs. Le changement est motivé avec détail dans divers articles insérés par M. l'Ingénieur en chef Emmery dans les *Annales des ponts et chaussées*.

Pour ne laisser rien à désirer, le profil des voies de communication doit rendre compte, en outre, de l'épaisseur et de l'espèce de construction de la chaussée. Le solide qui la forme ne doit rien au déblai ni au remblai ; c'est un ouvrage d'art absolument à part, ayant sa structure propre et indépendante d'aucun mouvement de terre. *Plus la portion de la dépense totale qui y correspond sera grande*, moins il y aura à tenir compte de celle des déblais, remblais et autres ouvrages.

Ce solide se construit habituellement de deux manières : il est fait en pavé ou en empierrement.

### *Chaussées en pavage.*

Le pavage s'effectue ordinairement avec des matériaux d'une grande dureté et susceptibles de durée, tels que les quartz, granits, et le grès dur. En Hollande et autres contrées, à Marseille et Toulon en France, sur des terre-pleins, où le roulage n'est pas considérable, l'on a pavé avec de la brique très-dure, posée de champ.

Quelle que soit l'espèce de matériaux employés, il faut réunir ceux de mêmes résistance, durée et dimensions, et fixer leur commun emplacement d'après cette résistance. Les rangées de matériaux doivent être généralement transversales et normales à l'axe des chaussées; au moins faut-il éviter de les placer à 45°, parce que les chevaux ne trouveraient point de joints en travers pour prendre pied. Les joints d'une rangée doivent correspondre d'ailleurs aux pleins des rangées adjacentes.

Le pavé est dit de *blocage*, quand les pierres qui le forment ne sont point assujetties à peu près aux mêmes dimensions, et présentent des formes polygonales très-variées. Il est dit *échantillonné* quand il est ébauché en solide parallélipipédique. Dans une foule de localités, on applique au pavage, des cailloux ovales et presque toujours quartzeux, roulés par les eaux des fleuves, qu'on pose debout, le gros bout en haut, en les couchant légèrement vers l'amont des chaussées.

L'expérience a appris : que le pavé échantillonné bien équarri, pour offrir prise aux pieds des chevaux, et résister convenablement aux pressions et aux chocs, devait avoir de $0^{m},16$ à $0^{m},20$ sur toutes les faces, avec un léger décroissement *vers la queue :* cette queue ne doit jamais être en pointe, et doit au contraire présenter une base rectangulaire.

Dans les carrières où le pavé se taille toujours sur le même panneau, il est avantageux d'avoir des panneaux qui donnent 1 fois $\frac{1}{2}$, 2 fois et même 2 fois $\frac{1}{2}$ la largeur d'un pavé ordinaire ; parce que cela facilite les croisements des joints, surtout dans les raccordements des chaussées entre elles pour le fond des rigoles d'eaux ; enfin partout où il y a des chances de dégradations plus nombreuses.

Les deux rives des chaussées sont formées de pavés durs dits *de bordure*, qui ont généralement en longueur et largeur deux fois les dimensions des pavés ordinaires, et une fois et demie leur épaisseur. Ces bordures consolident les abouts des rangées transversales, et s'enracinant plus profondément servent comme de *culées* aux voûtes circulaires des rangées de pavés.

La fondation d'un pavage doit être solide, durable, et répartir uniformément la charge sur le terrain. On peut l'effectuer, soit en béton soit en sable ; le premier moyen, qui est le plus coûteux, est réservé pour le fond des ruisseaux et pour le revers des pavages du côté des lieux habités. Le second, basé sur l'incompressibilité du sable encaissé, est généralement employé pour le fond de toutes les chaussées de routes ; l'épaisseur de la couche de sable est ordinairement de $0^{m},16$.

Les pavés sont séparés par des joints de 1 cent. au moins, qu'on avait toujours jusqu'ici remplis de sable, mais qu'on commence à Paris à garnir de mortier hydrauliques et même de mastic bitumineux. L'on a soin d'ailleurs, dans la pose sur sable, de tenir le dessus des pavés de 3 à 4 cent. plus haut que sa position définitive, afin de pourvoir au tassement que produit le battage *avec la hie*, quand une zône est achevée. Lorsque cette dernière

opération est faite, on étend sur la surface une couche de 3 cent. en sable ou l'on rejointoye en mortier hydraulique, suivant que les joints ont été faits avec l'une ou avec l'autre de ces matières.

Figures 99 des planches.

Dans le profil d'une chaussée formée par un arc de cercle convexe, la bordure est par sa position la partie de la chaussée qui a le plus de pente; aussi, lorsque l'une des roues des voitures atteint la bordure, elle glisse et tombe sur l'accottement où elle fait une ornière. On ne remédie qu'imparfaitement à cet inconvénient en faisant saillir de distance en distance des bordures dans l'accottement, ainsi qu'on l'a fait quelquefois. Ce moyen est au contraire une nouvelle cause de dégradation; un épaulement en cailloutis, qui s'appuie contre la bordure avec sa pente dans l'accottement est de beaucoup préférable, surtout dans les profils de chaussées *à revers*.

La pente longitudinale minimum des chaussées pavées peut être moindre que celle des chaussées en pierres, parce qu'il ne s'y forme pas des ornières et des ressauts comme dans celles-ci. Le conseil général des ponts et chaussées a réglé à un minimum de $0^m,002$ par mètre la pente longitudinale des rues de Paris, qui ont à conduire beaucoup plus d'eau que les rigoles des chaussées des routes; toutefois il serait préférable d'avoir $0^m,005$ ou même $0^m,007$ par mètre.

Résistance, durée et entretien des pavés.

Un article de M. l'Ingénieur en chef Coriolis, inséré dans les *Annales des ponts et chaussées* de 1834, fait connaître combien la résistance et la durée des pavés de grès varient suivant leur pesanteur spécifique, et la quantité d'eau qu'ils peuvent absorber. M. Coriolis émet l'avis qu'on ne doit employer au pavage que des grès dont la pesanteur spécifique soit au-dessus de 2,480 kil., et qui, immergés sous l'eau, n'absorbent dans 24 heures que 12 kil. d'eau par mètre cube.

Pour les travaux ordinaires de pavage, les brigades de paveurs sont, au minimum, formées de trois ouvriers; sauf à prendre pour les grands travaux des nombres multiples du précédent.

L'entretien des chaussées pavées consiste en *relevés à bout* et réparations *en recherche*. Le premier mode est généralement préférable, parce qu'il rend à la chaussée ses formes primitives, tandis que le remplacement des pavés isolés se fait mal et presque toujours en disloquant les pavés adjacents. On a soin dans les relevés à bout de réunir dans les mêmes zônes les pavés neufs et les pavés vieux.

On emploie ordinairement par mètre carré $0^{mc},08$ de sable neuf, dont $0^{mc},05$ pour rafraîchir la forme, et $0^{mc},03$ pour recouvrir la surface. A Paris

l'intervalle moyen des relevés à bout est de cinq ans, et le nombre des pavés de grès remplacés dans chaque opération est le dixième du nombre total. Dans les routes aux abords de Paris, les relevés à bout se font tous les huit à quinze ans; mais le remplacement en pavés neufs de grès est le huitième du nombre total des pavés.

Une chaussée pavée reste longtemps dans un état défectueux, parce que les réparations en recherches sont imparfaites, et qu'un relevé à bout force d'interrompre momentanément la circulation sur une partie de la route.

Dans les départements septentrionaux de la France, où la gelée et le dégel entrent profondément dans le sol, on est forcé d'interrompre momentanément la circulation par des barrières, dans les dégels, pour ne pas exposer les chaussées à une sorte de démolition.

*Chaussées en empierrement.*

Cette deuxième espèce de construction de chaussée est celle qui est généralement en usage. Elle était formée habituellement de trois couches: on y employait le moellon brut; on réservait le plus dur, surtout s'il était d'espèce siliceuse, pour la couche supérieure. Le fond de l'encaissement, qui était d'abord horizontal transversalement, avait été disposé ensuite en arc de cercle concentrique à celui de la chaussée; on épargnait ainsi une certaine épaisseur de matériaux.

Composition ancienne du massif des chaussées.

Figures 100 des planches.

La première couche, que l'on regardait comme la fondation de la chaussée, devait avoir 0m,24 d'épaisseur lorsque le fond de la forme était une surface concentrique à celle de la chaussée. Elle était faite en moellons posés de champ, sans ordre; on avait seulement le soin de ne pas laisser de vides; les pointes des moellons qui dépassaient servaient à lier cette première couche avec la seconde. Cette première couche pouvait être faite sans inconvénient avec du moellon tendre, et même gélif.

Elle était recouverte par la seconde couche, qui avait (0m,08) environ 3 pouces d'épaisseur; on employait pour celle-ci de la pierraille ramassée dans les champs, mais bien purgée de terre ou de cailloux, lorsqu'on pouvait s'en procurer; à défaut de cette matière on cassait du moellon, que l'on réduisait à la grosseur uniforme d'un cube de 0m,04 de côté au maximum, c'est-à-dire d'environ la grosseur d'une noix. Cette deuxième couche s'arrangeait sur la première au moyen de la pelle de fer; elle devait présenter une aire uniforme et satisfaire au profil adopté; elle pou-

vait d'ailleurs comme la première être formée de pierres de médiocre dureté et même gélives.

La troisième couche, qui avait également ($0^m,08$) environ trois pouces d'épaisseur, se faisait avec du gros gravier bien purgé de terre, ou, ce qui était préférable, avec des pierres dures, cassées avec soin au marteau, sur l'accottement, et réduites à la grosseur d'un cube de 1 pouce, ou $0^m,027$ de côté. Elle s'arrangeait sur la deuxième avec le râteau à dent de fer.

Ce massif de trois couches ayant $0^m,40$ d'épaisseur, qui constituait la chaussée en empierrement, était contenu sur ses abords par deux rangées de bordures; mais la surface supérieure de celles-ci, au lieu d'être posée en parement comme dans la chaussée en pavés, devait être cachée, ainsi qu'il a été dit, par l'empierrement qui la recouvrait: ces bordures ne montraient que leur arête lorsque l'empierrement était fini. Cette arête formait une ligne droite ou courbe parallèle à l'axe de la route, et séparait l'accottement de la chaussée.

Cette position de la bordure, déjà indiquée par les figures 99, présentait plusieurs avantages. Elle contenait les deuxième et troisième couches, avec lesquelles elle se liait; et en *arrasant* l'accottement, elle le fortifiait contre l'impression des roues des voitures qui tendait à le dégrader dans cette partie.

En analysant les propriétés et les résultats de ce genre de construction, on reconnaît qu'il présentait toute la solidité qu'on pouvait désirer, lorsque la chaussée était faite et surtout *entretenue avec soin*, et que les matériaux, particulièrement ceux des deux dernières couches, étaient bien choisis. En effet, les pierres qui composent la troisième couche s'arrangent et se mêlent, par l'effet du roulage, avec celles de la deuxième; les débris des surfaces qui s'usent, et dont les pluies détrempent les fragments, forment un ciment qui augmente les points de contact et remplit peu à peu tous les intervalles; il en résulte après un certain laps de temps un massif homogène, dur, uni à sa surface, et qui résiste parfaitement au roulage des plus lourdes voitures.

Quand le terrain n'était pas de bonne qualité, la première couche pouvait être assise sur un lit de pierres plates ou dalles, de 6 pouces ou $0^m,16$ d'épaisseur.

Sur un sol de rocher l'on épargnait la première couche, et l'on se bornait aux deux supérieures, qui n'avaient ensemble que $0^m,16$ d'épaisseur.

Un constructeur anglais, *Mac-Adam*, a donné son nom à un système d'empierrement fondé sur le principe : que les chaussées ne se détérioraient que par la pénétration de l'eau, dans les couches inférieures, et dans le terrain sur lequel elles étaient établies. En conséquence il a apporté des soins minutieux dans l'assèchement des plats-fonds des chaussées ; et réduisant leur épaisseur, il l'a composée uniquement de matériaux *bien purgés* de terre, et très-menus, dont l'entrelacement produit, selon lui, une sorte de béton imperméable. L'économie faite sur les matériaux lui a permis de plus d'empierrer presque toute la largeur des routes, et d'accroître la part de la main-d'œuvre dans la construction première et dans l'entretien journalier. Son système a été appliqué avec succès à d'anciennes routes de France, formées et entretenues *par les corvées*, et qui, malgré l'épaisseur considérable de leur massif, étaient en très-mauvais état. On les a défoncées, et les matériaux extraits de *cette espèce de carrière* ont été réduits en menus fragments et reversés dans un nouvel encaissement de chaussée. Système d'exécution à la Mac-Adam.

Les principes de *Mac-Adam* ont donné lieu à une polémique très active, dont les détails sont consignés dans divers mémoires de feu M. Navier, de M. Berthaut-Ducreux, de M. Polonceau et d'autres Ingénieurs. L'on est tombé au moins d'accord sur les points suivants : que la construction d'une route neuve n'exigeait pas l'épaisseur prescrite autrefois ; que la conservation de la viabilité dépendait beaucoup plus d'une main-d'œuvre journalière bien surveillée, de la pureté et des petites dimensions des matériaux des couches superficielles, de l'opportunité de leurs rechargements, que de leur abondance et même de leur dureté.

Au reste ces principes ne sont pas nouveaux. L'Ingénieur Trésaguet les avait indiqués dans des mémoires reproduits dans les *Annales des ponts et chaussées* de 1831. Feu M. Lamblardie père, premier directeur de l'Ecole polytechnique, s'exprimait ainsi dans le programme du cours de construction dont il était chargé à cette école (Ier cahier du *Journal de l'Ecole polytechnique*) :

« L'entretien des routes exige une main-d'œuvre constante, et cette main-
» d'œuvre constante est d'autant moins à négliger, qu'elle est le seul moyen
» de suppléer pendant quelques années aux matériaux qui commencent à
» manquer dans beaucoup de départements et qu'on est déjà forcé de prendre
» à des distances considérables des routes à réparer.

» . . . . . . . . Tous les jours il naît des hommes, mais la nature met

» bien du temps à former des pierres. Aussi l'emploi de cantonniers présente un mode de réparation plus économique et plus avantageux que » celui des rechargements; avec ce dernier moyen les routes ne sont » jamais roulantes ni en bon état. »

Une épaisseur de $0^m,16$ pour les routes départementales, de $0^m,18$ à $0^m,20$ pour les routes royales, paraît donc suffisante aujourd'hui pour un empierrement formé uniquement de matériaux, dont la grosseur maximum serait un cube de $0^m,04$ de côté ou dont le poids serait de $1^{kil.},50$ au plus; mais à la condition expresse que la route sera bien entretenue dans le même état et dans toutes ses parties.

Cette condition paraît satisfaite aujourd'hui sur les routes royales en France, par l'organisation de *cantonniers* de *station* de diverses classes, échelonnés suivant la fréquentation des routes et leur état de viabilité de lieue en lieue, ou même de trois lieues en trois lieues, et surveillés par des chefs cantonniers *ambulants*. Ces derniers sont eux-mêmes rangés dans diverses classes et dénominations. Ils forment avec les conducteurs non entretenus et entretenus, une chaîne continue d'action et de contrôle qui remonte jusqu'aux ingénieurs. Les cantonniers de stations réunis par groupes, renforcés au besoin par des ouvriers embauchés temporairement, effectuent les relevés à bout, rechargements et autres travaux de routes qui seraient au-dessus des forces d'un cantonnier de station isolé.

Influence de la nature des matériaux. Usure des massifs d'empierrement.

Des expériences dont l'initiative paraît appartenir à M. l'Ingénieur Berthaut-Ducreux, et qui ont été répétées par M. l'ingénieur Muntz, ont fait connaître : que dans un mètre cube de massif de chaussée, il y avait $0^{mc.},48$ de vide environ si les matériaux étaient anguleux et quelle que fût leur grosseur; $0^{mc.},382$ si les matériaux étaient arrondis et quelle que fût aussi leur grosseur; et que le mètre cube de ces matériaux mis en place et usés par le roulage, se réduisait à $0^{mc},70$.

D'un autre côté, M. Berthaut-Ducreux a trouvé par l'analyse des massifs de plusieurs anciennes chaussées; que les détritus formaient du $\frac{1}{3}$ au $\frac{1}{4}$ du volume réel; en sorte que le volume réel de pierres brisées et non réduites en détritus, variait dans ces massifs de $0^{mc.},31$. à $0^{mc.},38$, au lieu d'être, comme à l'origine de la construction de $0^{mc.},52$ à $0^{mc.},62$, suivant que les matériaux étaient anguleux ou ronds.

Delà l'idée émise par cet Ingénieur et développée par M. l'Ingénieur Girard de Candemberg, de prévenir la formation des détritus aux dépens

de la pierre, en mélangeant celle-ci, dans la construction des chaussées, avec des matières plus tendres convenablement choisies, et qui pussent en quelque sorte faire l'*office de mortier*.

M. Girard s'est servi d'argile sablonneuse, où l'argile était, relativement au sable, dans la proportion de 1 à 2, comme la chaux dans les mortiers. Ce travail a été fait par massivation avec des hies de paveur.

Dans le Bas-Rhin, M. l'Ingénieur Muntz a placé au fond des encaissements de nouvelles routes, une argile sablonneuse *plastique* rechargée de graviers, et dans les proportions de $0^{mc.},11$ de graviers et $0^{mc.},15$ d'argile.

*Dès* 1818, *dans les arrondissements de Vervins et de Saint-Quentin* dont les routes parcourues alors par les armées étrangères d'occupation étaient dans l'état le plus déplorable, et où le gravier et les matériaux résistants étaient rares et chers, on avait employé avec succès, des couches inférieures de calcaire tendre et même marneux, en les rechargeant d'une dernière couche superficielle de graviers ou de *schyste* granitique.

L'incompressibilité et les autres propriétés du sable, son emploi pour l'assiette des pavages de chaussées, font supposer qu'il pourrait aussi, avec avantage, être substitué aux couches inférieures des empierrements.

Les difficultés qu'éprouvent les véhicules de transport et particulièrement les voitures publiques sur les routes récemment empierrées; les dégradations que produit l'espèce de chute des roues dans le passage des aspérités, ont fait employer en Angleterre et en France des cylindres de Figures 101
compression qui rendent la viabilité facile. On trouve dans les Annales des planches.
des ponts et chaussées de 1837, la description et les dessins de quelques uns de ces nouveaux appareils.

L'usure uniforme moyenne, d'une chaussée en empierrement ordinaire, n'est, suivant M. Berthaut-Ducreux, que de 4 *centimètres d'épaisseur* pour une circulation journalière de cent colliers, et de 1 *centimètre* pour un accottement en détritus. Cet ingénieur estime dès lors que la quantité de matériaux nécessaire à l'entretien annuel *convenablement surveillé* d'un bon empierrement, est de 1 mèt. cube pour 4000 mèt., ou $0^{m.c.},25$ par kilomètre de longueur, par chaque collier de fréquentation journalière (sans distinction des véhicules pleins et vides).

M. l'Ingénieur Muntz est arrivé à des résultats compris entre $0^{m.c.},16$ pour le gravier du Rhin, et $0^{m.c.},28$ pour le *muschelkalk* par chaque

collier et par kilomètre. D'après divers calculs, il a conclu que les frais d'entretien d'une route royale n'étaient qu'à peu près 6 p. 100 des frais de transport. *Mais il faut y ajouter l'intérêt des frais primitifs de construction.*

On déduit des chiffres relatifs à trois années consécutives, concernant les routes de la Moselle et publiés par M. l'Ingénieur en chef Lemasson, dans les *Annales des ponts et chaussées* de 1834, que la consommation annuelle par kilomètre et par collier de fréquentation journalière, variait depuis $0^{m.c.}$,33 jusqu'à $0^{m.c.}$,60; que la moindre était pour les routes en gravier, et la plus forte pour des graviers mêlés à des scories de forges et à du calcaire *oolitique*.

Les dépenses relatives des matières et des mains-d'œuvre dans les routes du Bas-Rhin, suivant M. l'Ingénieur Muntz, sont comme 100 est à 92. On a trouvé dans la Moselle, le rapport 59 à 34, si l'on comprend le cassage dans la main-d'œuvre; et le rapport de 1 à 1 en laissant le cassage avec les fournitures.

L'usure des routes, et particulièrement des routes empierrées, provient d'abord de l'action du temps, des gelées et des pluies sur les matériaux élémentaires; puis du poids des chargements qui parcourent les routes; enfin, du nombre total et annuel des chargements.

Les poids des chargements agissent comme pression sur une route bien unie; mais, sur une route raboteuse, le passage des roues détermine à chaque aspérité des petites chutes dont l'effet est bien plus grave.

De plus, si les véhicules sont animés d'une grande vitesse de transport, les matériaux en saillie sur les routes sont roulés, ou brisés par le passage.

Les matériaux des routes ayant des résistances très-variables d'une route à l'autre, et d'une zône à l'autre de la même route, enfin d'une époque de l'année à l'autre, des dispositions administratives et législatives ont dû fixer les limites des chargements en raison des surfaces de contact avec les routes, des jantes des roues des divers véhicules de transport.

Dans cette fixation on a donné en quelque sorte *une prime* aux chargements modérés qui n'emploient que deux et trois chevaux.

En effet, des jantes de roues très-larges peuvent souvent ne toucher le sol de la route que par un petit nombre de points, en sorte qu'elles seraient plus nuisibles qu'utiles.

Tarif des chargements en France.

Une ordonnance récente, précédée de nombreuses expériences sur la résistance des matériaux des diverses routes de France et qui devait être convertie en loi dans la session de 1838, a posé le tarif suivant :

| 1° *Pour diligences et messageries non suspendues, allant au trot.* | | | | | *Au maximum par centimètre de largeur de bandes.* | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LARGES BANDES. | Voitures à 2 roues. | | Voitures à 4 roues. | | Voitures à 2 roues. | | Voitures à 4 roues. | |
| | du 20 nov. au 1er avril. | du 1er avril au 20 nov. | du 20 nov. au 1er avril. | du 1er avril au 20 nov. | Hiver. | Été. | Hiver. | Été. |
| | kil. | kil. | kil. | kil. | kil. | kil. | kil. | kil. |
| De 7 à 8 cent. | | | 1800. | 2200. | | | 257. | 314. |
| De 8 à 9 | 1100. | 1300. | 2200. | 2600. | 137. | 162. | 275. | 325. |
| De 9 à 10 | 1300. | 1500. | 1600. | 3000. | 144. | 166. | 288. | 333. |
| De 10 à 11 | 1500. | 1700. | 3000. | 3400. | 150. | 170. | 300. | 340. |
| De 11 à 12 | 1700. | 1900. | 3400. | 3800. | 154. | 172. | 310. | 345. |
| De 12 et au-dessus. | 1900. | 2100. | 3800. | 4200. | 158. | 175. | 316. | 350. |

On alloue un centimètre de tolérance sur les largeurs, et 200 kil. sur le poids total.

| 2° *Pour diligences et messageries à 4 roues suspendues sur ressort, allant au trot.* | | | | | *Au maximum par centimètre de largeur de bandes.* |
|---|---|---|---|---|---|
| LARGES BANDES. | Voitures à 2 roues. | | Voitures à 4 roues. | | |
| | du 20 nov. au 1er avril. | du 1er avril au 20 nov. | du 20 nov. au 1er avril. | du 1er avril au 20 nov. | |
| | | | kil. | kil. | kil. |
| De 7 cent. | | | 2400. | 2600. | ou 343 kil. par centim. en hiver et 370 en été |
| De 8 | | | 3100. | 3400. | 387 — — 425 |
| De 9 | | | 3400. | 3800. | 377 — — 422 |
| De 10 | | | 3700. | 4100. | 370 — — 410 |
| De 11 | | | 4000. | 4400. | 363 — — 402 |

| 3° *Pour voitures de roulage et autres employées au transport et allant au pas.* | | | | | *Au maximum par centimètre de largeur de bandes.* | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LARGES BANDES. | Voitures à 2 roues. | | Voitures à 4 roues. | | Voitures à 2 roues. | | Voitures à 4 roues. | |
| | du 20 nov. au 1er avril. | du 1er avril au 20 nov. | du 20 nov. au 1er avril. | du 1er avril au 20 nov. | Hiver. | Été. | Hiver. | Été. |
| | kil. | kil. | kil. | kil. | kil. | kil. | kil. | kil. |
| De 11 à 14 cent. | 2700. | 3200. | 4400. | 5200. | 245. | 290. | 400. | 472. |
| De 14 à 17 | 3500. | 4100. | 5600. | 6700. | 250. | 292. | 400. | 479. |
| De 17 et au-dessus. | 4100. | 4900. | 6800. | 8100. | 247. | 288. | 400. | 476. |

On avait proposé d'apprécier le poids du véhicule et de la charge en raison du nombre de chevaux employés au tirage; mais ce moyen eût été illusoire à raison 1° de la force des chevaux, variable du simple au triple; 2° des variations de cette force pour le même cheval, suivant *son allure de marche et son état sanitaire*; 3° des montées et descentes plus ou moins rapides d'une route; 4° de l'état même de sa viabilité.

Malgré les inconvénients nombreux des ponts à bascule et les reproches adressés à leurs préposés, ce mode de constater le poids du chargement est le seul rationnel et praticable, toutes les fois qu'on ne peut vérifier *séparément* le poids des objets qui composent ce chargement. L'on sait que la plate-forme de pesage est en communication, par un système de leviers coudés avec une balance placée à l'intérieur de la loge du préposé. On a proposé d'y adapter une *aiguille compteur*, fonctionnant indépendamment de la volonté du préposé, et qui permettrait aux conducteurs et voituriers de vérifier les poids annoncés. M. l'Ingénieur Nadault-Buffon a inséré dans les *Annales des ponts et chaussées* de 1837, une note sur la suppression des *verrins* dans les ponts à bascule.

Figures 102 des planches

On renvoie pour plus de détails, sur les modes de construction et d'entretien des routes en empierrement;

Aux mémoires de Trésaguet, de feu M. Navier, de MM. Berthaut-Ducreux, Muntz, Lemasson, Girard de Caudemberg, Léon, Boisvilette, Doyat, et autres Ingénieurs, insérés en partie dans les *Annales des ponts et chaussées* de 1831 à 1837;

Aux *Instructions sur le service des routes de Prusse*, publiées par M. Vauvilliers, Inspecteur divisionnaire des ponts et chaussées, dans les mêmes *Annales*, en 1834 et 1835;

A l'ouvrage de feu M. Navier, intitulé : *Considérations sur la police du roulage*;

Enfin à ceux de M. Polonceau, Inspecteur divisionnaire des ponts et chaussées.

# RÉSUMÉ DE LA QUINZIÈME LEÇON.

AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS RESPECTIFS DES CHAUSSÉES PAVÉES ET EMPIERRÉES. — INDICATION DE QUELQUES OUVRAGES POUR L'ÉCOULEMENT DES EAUX. — PRINCIPES GÉNÉRAUX A SUIVRE DANS LA RÉDACTION DES PROJETS DE ROUTE ; OPÉRATIONS PRÉLIMINAIRES.

---

*Avantages et inconvénients respectifs des chaussées pavées et empierrées.*

Les chaussées pavées et empierrées, considérées relativement aux transports, donnent lieu aux observations suivantes :

Les premières sont plus rudes pour le transport des voyageurs; mais M. l'Ingénieur en chef Schwilgué, dans un *Mémoire sur le roulage*, inséré aux *Annales des ponts et chaussées* de 1832, a trouvé que pour les voitures de roulage, comme pour les diligences, les effets utiles de la force du cheval étaient dans les rapports de 3 à 2 sur les chaussées pavées et empierrées de la route de Rouen à Paris. Ce résultat, déduit d'un grand nombre de faits et de données; est d'une application essentiellement pratique. Dans des expériences sur une petite échelle, l'on avait obtenu le rapport de $\frac{1}{50}$ pour celui du tirage à la pression sur les chaussées pavées, et ceux de $\frac{1}{30}$ à $\frac{1}{15}$ pour des routes empierrées en bon état; M. Navier avait même observé que ce rapport s'élevait jusqu'à $\frac{1}{14}$ pour *les voitures allant au trot.*

Les routes pavées sont exemptes de la boue et de la poussière qui en hiver et en été recouvrent les routes empierrées; elles supportent plus facilement que celles-ci des lacunes dans les entretiens courants. Mais dans les contrées septentrionales le dégel, comme on l'a déjà dit, force d'interrompre la circulation momentanément sur les chaussées pavées. De plus, les relevés à bout des pavages gênent bien plus la circulation que les rechargements partiels des empierrements.

Si l'on compare les deux genres de routes sous le rapport de la dépense première; l'on remarquera qu'ils ont en commun les déblais et remblais et les ouvrages d'art; et que plus cet élément de dépense sera considérable, moins l'économie totale dans la substitution de l'empierrement au pavage sera importante. Cette économie dépend d'ailleurs des ressources des carrières, de leur éloignement, du mode de transport, etc. Le mètre carré

de pavage peut varier en effet depuis 4 fr. jusqu'à 40 fr. et au delà; et celui d'empierrement depuis 1f,60 jusqu'à 16 fr. et au delà.

D'après les documents statistiques sur les routes royales et départementales, publiés en 1837 par l'administration des ponts et chaussées, pour les routes royales à l'état de *lacunes*:

Le mètre courant de longueur de routes pavées à neuf ressortirait moyennement à 44 fr. sur une longueur totale de 175,136 mèt. :

Et celui des routes empierrées à près de 19 fr. sur une longueur totale de 3,767,306 mèt. :

La dépense d'entretien d'un mètre de longueur des routes royales ressortait, d'après les mêmes documents, à une moyenne de 0f,82 pour les routes à chaussée pavée et sur une longueur totale de 3,134,343 mèt. de route à l'*état d'entretien* ; et à 0f,30 pour celles à chaussées empierrées sur une longueur totale de 21,582,813 mètres à l'*état d'entretien.*

Pour les routes départementales, le mètre courant, de longueur de lacunes à exécuter en empierrements, s'arrête moyennement à 9f,39 sur 10,001,986 mèt., de longueur totale; et l'entretien annuel ne ressort moyennement aussi qu'à 0f,31 par mètre sur 22,051,838 mèt.

Les chaussées sont ordinairement pavées aux abords et dans les rues des villes, ainsi que dans les traverses des villages. On a employé aussi le pavage pour des parties de routes établies sur un sol marécageux, et dans des lieux où il y avait peu d'écoulement pour les eaux, et où les accottements n'étaient que rarement praticables aux voitures.

Les roues des voitures de transport suivent ordinairement les mêmes *frayés* ou *ornières*; des Ingénieurs distingués, et notamment M. Polonceau, en 1828, ont proposé des chaussées mixtes, où ces *frayés*, dits *rouages*, seraient formés de matériaux plus résistants, plus lisses que les zônes intercalaires.

Routes avec lignes de rouages.

Ainsi, ces *rouages* seraient en dalles de pierres, et en pavés d'échantillon, quand les zônes *intercalaires* seraient en pavés de blocage ou en cailloutis. Les figures 103 des planches indiquent ce système mixte. Il a été appliqué en 1829, en Angleterre, à la route *Commercial-Road*, et au bout de cinq ans il n'y avait encore aucune trace de roues sur les dalles qui étaient en granit d'Ecosse. M. l'Ingénieur Minard évalue le frottement à $\frac{1}{92}$ de la charge, ce qui n'est que le tiers environ du rapport analogue sur une bonne route pavée, et permettrait d'exécuter les transports avec trois fois moins de chevaux, sur des routes qui seraient à peu près horizontales.

Figures 103 des planches.

*Des alignements et des pentes longitudinales des routes, des cassis, écharpes, etc.*

Les routes peuvent être envisagées relativement à leur position en pays de plaines ou de montagnes; car cette situation quelquefois motive des différences assez tranchées.

La directrice d'une route est une ligne rationnelle qui, avec celle de pente, détermine dans l'espace, la position de la route.

*Alignement*, dans l'acception adoptée par les ponts et chaussées, est la projection horizontale de la directrice, ou une partie de cette directrice elle-même. Cette ligne peut d'ailleurs être droite ou courbe.

On peut concevoir une route comme engendrée par le mouvement de son profil transversal, parallèlement à lui-même et perpendiculairement à l'alignement.

Dans un pays de plaines, les principaux alignements sont ordinairement en ligne droite, et ne comportent que des pentes légères.

Les raccordements d'alignements différents s'effectuent par des courbes circulaires, elliptiques, paraboliques ou autres, tangentes aux deux directions angulaires. On indiquera plus bas le mode de tracé sur le terrain. La forme circulaire ayant toujours la même courbure doit être préférée, toutes les fois qu'elle sera exécutable. Le rayon de courbure minimum des raccordements doit être réglé d'ailleurs de manière que les voitures les plus longues, y compris leurs trains d'attelages, puissent cheminer de front ou se croiser sans être gênées. On peut arriver à ce but par un élargissement de la route. L'on trouve dans les *Instructions sur le service des routes en Prusse* insérées dans les *Annales des ponts et chaussées* de 1834 et 1835, et déjà citées : que la largeur d'une route doit être augmentée de $\frac{1}{4}$ pour un tournant compris entre 120° et 90°; de moitié si l'angle est de 90° à 60°; et que si l'angle est au-dessous de 60°, il faut établir sur les rives une gare d'attente à proximité.

Les parties de niveau sont à éviter particulièrement pour les chaussées en empierrement. Cette recommandation est fondée sur ce que, dans une route de niveau, l'on est obligé d'augmenter les pentes transversales pour faciliter l'écoulement des eaux, ce qui est gênant et même dangereux pour les voitures. L'on exige donc au moins $0^m,008$ de pente longitudinale par mètre *pour les routes empierrées*.

Pour assurer mieux encore l'assèchement des routes, qui est une con-

dition si essentielle de leur viabilité, on élève souvent leur surface d'un demi-mètre au moins au dessus des terrains environnants; on économise ainsi les fossés. L'écoulement des eaux d'une rive à l'autre de la route s'effectue alors : soit au moyen d'un grand nombre de *pierrées*, ou de petits aqueducs qui doivent avoir au moins 50 centim. en quarré de débouché pour qu'un homme y puisse pénétrer et les nettoyer; soit au moyen de ponteaux et même de ponts.

La limite supérieure des pentes longitudinales sauf les exceptions quelquefois inévitables en pays de montagnes est de $\frac{1}{18}$ ou de $0^m,055$ par mètre (4 pouces par toise). Ces pentes sont ordinairement de $2^c,25$ à $3^c,50$ par mètre, et résultent au reste de la forme du terrain, dont les inégalités font monter, descendre et remonter successivement.

Une rampe qui suit immédiatement une pente s'appelle contre-pente; et dans le cas d'une pente qui succède à une rampe, elle se nomme contre-rampe. Le premier cas occasionne un pli creux, le second une arête. On les arrondit par des courbes, l'une concave, l'autre convexe.

Cassis. Le pli creux formé par le passage d'une pente à une rampe, recevant les eaux pluviales qui coulent le long de la route avec d'autant plus d'abondance que la pente est plus longue et plus prononcée, il devient nécessaire ou d'y établir un aqueduc, ou de revêtir le pli par un pavage à un ou deux versants, qui procure un écoulement transversal aux eaux. Cet ouvrage se nomme *cassis*.

La largeur du *cassis* est subordonnée au volume d'eau auquel il doit procurer l'écoulement.

On lui donne depuis 3 jusqu'à 6 mètres d'ouverture, avec $\frac{1}{12}$ de flèche au plus.

Si le cassis a lieu sur une levée en remblai, et si la hauteur de cette levée est considérable, on en revêt les talus en maçonnerie à pierre sèche; quelquefois on construit même un *mur de chute* pour empêcher les effets de corrosion par la chute de l'eau.

Les cassis exigent en aval des fossés pour procurer l'écoulement des eaux.

Ces ouvrages sont sujets à beaucoup d'entretien; et dangereux en hiver à cause des glaces. Il vaut mieux, lorsque les localités et les fonds le permettent, leur substituer des aqueducs, avec de petits puits verticaux, grillés en fer à leur orifice supérieur. Figures 104 des planches.

Outre les cassis perpendiculaires aux routes, il y a encore des cassis à *chevrons* et des cassis *obliques*. Les cassis à chevrons s'emploient dans les pentes fortes, afin de procurer l'écoulement à la fois à droite et à gauche de la route.

Le cassis à chevron brisé doit être employé de préférence au cassis oblique à la route, parce que, dans la première disposition, les roues de voitures sont moins tourmentées pour franchir le ressaut, que dans la seconde. Figures 105 des planches.

Les cassis obliques sont particulièrement destinés aux routes en pays de montagnes.

Écharpes.

La nécessité d'éloigner les eaux pluviales des *chaussées*, et de prévenir les dégradations dans des pentes longues et prononcées, a fait imaginer d'autres ouvrages que les cassis, mais du même genre; ce sont les *écharpes*. Ces ouvrages sont des espèces de rigoles en pierres brutes, et quelquefois en pavé, qui traversent les accotements, et dont le prolongement vers l'axe de la route forme, avec cet axe, un angle de 100 à 120°; leur sommet est vers l'origine de la pente. Mais on a reconnu que les eaux formaient alors des ravins dans les accotements, et que les roues des voitures qui passaient sur les écharpes éprouvaient des secousses très-vives. Figures 106 des planches.

Le tracé des *écharpes* ou *cassis obliques* doit être fait de manière à procurer la plus grande pente sous la moindre longueur; en évitant toutefois que l'axe du *cassis* coïncide avec la diagonale du rectangle formé par les points d'appui des voitures à quatre roues.

Voici le procédé graphique de cette recherche :

Sur DB et BC, projections des profils en travers et en longueur d'une route formant entre elles un angle droit, soient prises deux parties AB et BC égales à l'unité de mesure, $n$ représentant la pente en travers à l'extrémité de l'une, et $m$ la pente en longueur à l'extrémité de l'autre. Soit cette dernière plus forte que la première; on demande de déterminer la position DE d'un cassis tel, qu'il ait le plus de pente possible. Figures 107 des planches.

Pour trouver dans l'angle DBC, la ligne BE de plus grande pente, il faut chercher dans le plan rampant de la route la ligne CD qui soit de niveau; alors si par le sommet B on mène la perpendiculaire BB, elle sera évidemment la ligne cherchée, et par conséquent elle sera la projection de l'angle que doit faire la direction du cassis avec la projection du profil en travers.

Puisque $m>n$, il est évident que c'est sur le prolongement de AB qu'il faut chercher le point D, qui soit de niveau avec C; et l'on trouvera facilement ce point D, si l'on considère, que par hypothèse, on a $(AD+AB)n=BC\times m$, ou faisant $AD=x$, $(x+1)n=1\times m$.

D'où l'on tire $x=\frac{m-n}{n}$; et par conséquent, $DB=\frac{m}{n}$.

On aura facilement la valeur de l'angle DBE, que forment entre elles les projections du profil en travers et la direction du cassis, si l'on considère que EC est le cosinus de l'angle ECB=DBE.

Et l'on trouve, par la considération des triangles semblables, DBC et BEC,

$$\cos. EBC = \frac{1}{\sqrt{\frac{m^2+n^2}{n^2}}} = \frac{n}{\sqrt{m^2+n^2}}$$

Dans les pentes rapides, les eaux pluviales à la suite des orages, occasionnent quelquefois des dégradations profondes, soit dans les fossés des parties de routes en déblai, soit dans les talus des parties en remblai; on les prévient :

Figures 108 des planches.

1° Pour les fossés, en disposant longitudinalement leur plat fond par gradins étagés, et en consolidant les murs de chute de ces gradins par des maçonneries en pierres sèches, ou des parois en bois dont la résistance soit toujours croissante de l'amont à l'aval de la pente.

2° Pour les talus de remblais, en *cantonnant* en quelque sorte les dégâts c'est-à-dire en forçant les eaux de couler en dedans de l'accottement, soit *par le profil à revers de la route*, soit par le relief d'un trottoir de piétons; en leur ouvrant de distance en distance des débouchés vers le bord de la route; et en revêtissant en ces points les talus des remblais par des pérés en pierres sèches.

On pourrait aussi évacuer les eaux par des petits puits en maçonnerie ménagés dans les accottements, et communiquant par le bas avec le pied des talus.

Le *Manuel des chemins vicinaux* de MM. Flachat et Bonnet renferme beaucoup de détails sur les menus ouvrages de conservation et d'entretien des routes.

Routes dans des terrains marécageux.

Lorsqu'une route traverse un marais, et en général lorsqu'elle est placée sur un sol tourbeux ou de peu de consistance, on l'établit quelquefois sur un grillage en bois ou sur un fascinage; à moins qu'on ne préfère recharger à loisir les remblais en terre ou cailloutis, à mesure qu'ils s'affaissent.

Figures 109 des planches.

On place un premier lit de fascinages transversalement à la route, mais avec un peu d'obliquité vers l'amont; puis une couche de gravier de 40 à 50 cent. d'épaisseur; puis une deuxième couche de fascinages croisée avec la précédente, surmontée à son tour d'une deuxième couche de gravier de 30 cent. d'épaisseur; sur cette dernière on établit enfin l'encaissement. Les fascines ont des longueurs variables de 1^me^,50 à 2^me^,50, et des grosseurs entre 20 cent. et 30 cent. de diamètre. Les lits de fascines forment une sorte de grillage flexible, léger, perméable à l'eau, qui répartit le poids de la route sur une grande surface. Dans les marais d'eau douce on emploie des fascines vertes, parce qu'elles peuvent y végéter.

La Hollande fournit des exemples d'une semblable construction en fascinage. L'on peut citer la digue de *Peten* : un massif de fascinage y est établi sous le remblai, et repose sur un sol marécageux. La construction de l'ancienne digue, avec laquelle la nouvelle se raccorde, remonte à une époque assez reculée; le grillage en fascinage qui sert de fondation à cette digue est parfaitement conservé.

Le constructeur anglais Mac-Adam, déjà cité, a élevé avec succès une chaussée en empierrement en menus cailloutis à travers une contrée très-marécageuse, en se bornant : 1° à assurer l'écoulement des eaux par de nombreuses pierrées ou petits aqueducs à pierres sèches, ayant un débouché de 20 cent. en carré au moins, ménagées sous le massif de la route; 2° à border cette dernière par des fossés *réservoirs* d'une grande section. Figures 110 des planches.

On a remarqué au reste que les chaussées assises sur des terrains peu résistants, mais légérement élastiques s'usaient moins rapidement que celles qui étaient fondées sur le rocher, parce que ce dernier réagit alors comme une *sorte d'enclume*.

*Principes généraux à suivre dans la rédaction des projets de routes, et opérations préliminaires à cette rédaction.*

Le problème à résoudre dans la rédaction d'un projet de route, c'est de desservir les intérêts généraux de l'état et ceux du commerce, avec la moindre dépense initiale de construction, et la moindre dépense d'entretien; soit que ces dépenses chargent exclusivement les fonds du trésor de l'état, des départements et des communes, ou retombent par des droits de péage sur le commerce, et viennent s'ajouter aux frais de transport.

Les intérêts généraux de l'état sont relatifs à ses moyens d'attaque et de défense militaire. Une route, sous ce point de vue, doit donner le plus de facilité que possible pour faire arriver rapidement et avec sécurité les troupes et les munitions de guerre à des points déterminés, tels que les places et forts des frontières. Il faut en conséquence que les routes traversent des lieux habités, et à la distance ordinaire des étapes militaires. Servitudes militaires.

Les directions des routes aux abords des frontières ne doivent être ni dominées ni enfilées par les hauteurs où l'ennemi pourrait se placer. S'il s'agit d'arriver à un pont sur une rivière de séparation de deux états, au delà de laquelle des ouvrages défensifs pourraient être établis, il est nécessaire de diriger sur une certaine longueur l'alignement de la route paral-

lèlement à la rivière, pour déboucher sur le pont par un alignement courbe bien développé.

Mais comme l'on doit prévoir les chances diverses de la guerre; que les routes formées pour la défense peuvent être ensuite favorables aux attaques de l'ennemi, les conditions militaires ou stratégiques d'une route deviennent très-complexes pour toutes les régions d'un pays qui sont comprises dans les zônes de défense. Ces conditions doivent être l'objet spécial de conférences entre les Ingénieurs des ponts et chaussées et les officiers du génie militaire dans les divers degrés hiérarchiques, et sont réglées par les ministres compétents sur les propositions de la *commission mixte des travaux* publics.

Intérêts du commerce.

Les intérêts du commerce sont également très-variés, et d'autant plus difficiles à apprécier, que les routes étant un des grands moyens de développement du commerce, on ne saurait prendre l'état de choses antérieur à l'établissement d'une route comme point de départ pour prévoir l'état futur. En effet, si des routes nouvelles ont dû être dirigées entre des foyers d'agglomération de la population; il est arrivé aussi que ces agglomérations se sont portées sur des routes dont les rives étaient d'abord désertes.

En assujettissant une route nouvelle à passer par des villes ou villages déjà existants, on facilite sans doute les relations entre des points voisins; mais il peut arriver souvent aussi que par les détours, les allongements et difficultés de trajet qui en résultent, le commerce général *de transit entre les points extrêmes* de la route supporte plus de frais de transport.

Il est donc essentiel de se rendre compte du mouvement général de la circulation qui s'établira sur les diverses parties d'une route projetée, et d'examiner s'il est plus avantageux de faire servir à la fois cette route au transit général et aux communications départementales, cantonnales et vicinales, ou de ne se préoccuper que du premier objet, sauf à exécuter des voies directes d'embranchement pour desservir le second.

L'intérêt général du commerce est que le transport entre les divers points de *sujétion invariables* de la direction d'une route, soit le moins coûteux et le plus prompt que possible. Cette condition exigerait, indépendamment des considérations de dépense première, un alignement droit entre deux points de sujétion consécutifs, s'ils étaient au même niveau; mais s'ils sont à des niveaux différents, le problème se complique. En effet, lorsque le mouvement de transit se fait en descendant et *par les véhicules usités*, il y a une limite dans la pente qu'on ne peut dépasser sans aggraver considérablement les risques, et sans exposer les routes elles-mêmes à

d'énormes dégradations ; d'aprés l'expérience, cette limite est de 0m,10 par mètre. Si le mouvement de transit est ascendant, il faut mettre en parallèle l'excédant de force nécessaire pour franchir une rampe roide, avec l'augmentation de développement dans le trajet qui résulterait de l'allongement de cette rampe. Cette question, l'une des plus intéressantes de l'art de l'Ingénieur, a été souvent étudiée.

M. l'Ingénieur en chef Lenglier a publié à cet égard, dans la *Deuxième collection lithographique des ponts et chaussées*, un mémoire fort important. En partant du principe que, dans une montée un cheval ne doit pas éprouver plus de fatigue qu'en plaine, il est arrivé à poser la limite maximum de 6 cent. par mètre. M. l'Ingénieur Goux, dans un article fort intéressant relaté dans les *Annales des ponts et chaussées* de 1834; partant d'un autre principe (déja posé par MM. Corrèze et Manès dans un article inséré aux mêmes *Annales* pour 1832), que la fatigue *utile* d'un cheval devait croître en même temps que la fatigue *inutile*, est arrivé à conclure :

1° Que pour les chevaux d'une diligence traînant chacun au trot 300 kilog., la pente la plus convenable était de 0m,03 par mètre.

2° Que toutefois il y avait plus d'économie de temps et de force motrice à faire monter une diligence au pas sur une pente de 0m,07 par mètre, que de lui faire franchir au trot une côte de 0m,03 de pente, *entre les mêmes points de départ et d'arrivée.*

3° Que pour les chevaux de roulage, traînant au pas 1,200 kilog., la pente la plus convenable était 0m,05 par mètre.

4° Que lorsque, par des changements possibles dans les points de départ et d'arrivée, les diverses pentes ne modifiaient pas sensiblement les longueurs de trajet, il fallait préférer les pentes les plus douces.

MM. Corrèze et Manès, dans l'article cité, étaient arrivés à des conclusions différentes ; mais M. l'Ingénieur Girard de Caudemberg a fait voir, dans une note insérée aux *Annales des ponts et chaussées* de 1832, que ces conclusions ne s'appliquaient qu'à des circonstances tout à fait exceptionnelles.

L'on est convenu généralement d'adopter pour limite supérieure des rampes 0m,07 par mètre, ou $\frac{1}{14}$. Cette limite doit faire attacher une grande importance à franchir à la moindre élévation que possible les reliefs de terrains intermédiaires entre deux points de sujétion successifs d'une route projetée.

Il faut donc aussi rechercher quels sont les maxima et minima absolus ou relatifs des divers reliefs du terrain.

La configuration superficielle du globe présente des arêtes de reliefs qu'on nomme *faîtes*, et des arêtes de creux qu'on nomme *thalwegs*. Les lignes principales et les versants qui leur correspondent sont de différents ordres, et en descendant du faîte d'une chaine principale, on rencontre, tantôt parallèlement à cette chaine, tantôt perpendiculairement ou obliquement à sa direction, des thalwegs secondaires auxquels succèdent des faîtes secondaires, et ainsi de suite, jusqu'au thalweg le plus profond du bassin. On a remarqué que l'inclinaison des lignes de faîte et de thalweg, et celle de leurs versants devenaient d'autant plus rapides, que les ordres auxquels ces lignes appartenaient étaient plus secondaires.

Figures 111 des planches

Le relief d'un pays s'exprime par des sections horizontales équi-distantes, réunies par les lignes de plus grande pente.

Les maxima et minima absolus ou relatifs portent le nom de *cols* ou passages, et correspondent aux plus grandes vallées. Une de leurs particularités géométriques est : que le plan tangent à la surface du creux y est horizontal, et coupe les reliefs environnants suivant deux courbes, dont les tangentes renferment les *faîtes des montagnes*, entre deux angles très-obtus. Le mémoire remarquable de MM. Brisson et Dupuis de Torcy, sur l'*Art de projeter les canaux de navigation*, publié à la suite de l'*Essai sur la navigation* de M. Brisson ; les mémoires de M. l'Ingénieur géographe Denaix, sur la *Géographie physique du globe*, fournissent des documents très-utiles pour le tracé des routes en pays de montagne.

Figures 112 des planches

Influence des dépenses de construction et d'entretien.

Mais on n'a pas encore parlé d'un autre élément de la question, qui est la dépense de construction et d'entretien.

La première se compose, outre les encaissements et autres ouvrages superficiels des routes, des déblais, remblais, percements de rochers par tranchées ou galeries souterraines; des ponts sur les cours d'eau à franchir; des *viaducs* pour la croisée des chemins existant à des niveaux différents de celui de la route projetée, etc., etc. Une partie de cette dépense première croît généralement avec la longueur de la route; mais la seconde peut être moindre pour un tracé de plus grand développement. Les frais d'entretien de la *voie* de la route proprement dite croissent aussi généralement en raison de la longueur de la route; mais la partie de ces frais, qui est relative aux revêtements des déblais et remblais, et aux ouvrages d'art, peut, comme la dépense première de construction, être moindre pour un tracé d'un développement plus grand.

L'exposition d'une route peut influer beaucoup sur sa viabilité, surtout

dans les pays, à neige, ou très-humides. On préfère généralement, quand cela est facultatif, l'exposition au midi.

Dans les déblais et remblais, qui forment une partie notable de la dépense totale, l'économie consiste généralement :

1° A ce qu'ils soient des *minima* en volume, ou plutôt en dépense; car les tranchées profondes et les remblais très-élevés présentent souvent de grandes difficultés.

2° A ce qu'il y ait équivalence entre les uns et les autres, afin qu'on soit dispensé d'enlever du terrain à l'agriculture pour suppléer à l'insuffisance des déblais, ou pour y déposer leurs excédants. Pour cette équivalence, il faut tenir compte; et du foisonnement des terres déblayées qui, suivant leur nature, peut varier depuis $\frac{1}{7}$ jusqu'à $\frac{1}{2}$, en sus du volume primitif; et du tassement des remblais, qui, suivant la nature des terrains qui leur servent de base, peut varier de $\frac{1}{10}$ au triple et quadruple de la hauteur exigée, particulièrement dans les terrains vaseux et tourbeux.

3° A ce qu'il y ait un minimum de distance de transport des lieux de déblais à ceux de remblais.

Mais l'économie dans la construction première et l'entretien serait, au-delà de certaines limites, une faute s'il devait en résulter un plus grand développement de la route, et un surcroît considérable de frais de transport. Cette faute serait d'autant plus grande, que la circulation sur la route aurait plus de chances d'accroissement dans l'avenir. L'économie pour le commerce pourrait donc fort bien manquer dans un projet qui satisferait seulement aux conditions précédentes posées pour les déblais et remblais.

Quelques-unes de ces conditions elles-mêmes perdent de leur importance dans beaucoup de localités; par exemple, dans les pays arides et de montagnes, le terrain a une valeur si faible qu'il serait oiseux d'en tenir compte; d'ailleurs, il arrivera souvent que le transport des déblais aux remblais coûterait plus par la grandeur des distances, que les retroussements pour les uns, et les emprunts voisins pour les autres.

On n'a pu qu'indiquer ici les principales vues politiques, administratives et techniques, qui doivent être envisagées dans le projet d'une route; mais leur combinaison n'est évidemment pas un problème susceptible d'une solution générale. On pourra consulter avec fruit, comme exemples de bonnes applications : 1° les études relatives à diverses routes de Piémont et d'Italie, consignées dans l'ouvrage publié par M. Goury aîné, sous le

titre : *Souvenirs polytechniques*, et dans les planches 25, 26 et 41 de l'atlas de cet ouvrage; 2° les publications relatives aux routes du Mont-Cénis, du Simplon et du Tyrol; 3° un article de M. l'Ingénieur Tostain, sur les routes du département de la Manche, inséré aux *Annales des ponts et chaussées* de 1836.

Il serait bien désirable que les mémoires analogues pour d'autres projets de routes fussent également livrés à la publicité; ce seraient les leçons les plus fructueuses pour ce genre d'études.

Quelques méthodes ingénieuses de tracé de routes ont été indiquées dans les cours faits à l'Ecole des ponts et chaussées, par feu M. l'Ingénieur en chef Dulcau. Elles s'appliquent à des cas simples, qui se présentent assez souvent, et l'on croit utile de les reproduire ici.

Méthodes pour fixer la direction des routes, dans les cas les plus simples.

S'il s'agit de réunir deux points A et B, situés dans deux plaines séparées par un coteau rapide; la première solution qui se présenterait, serait de les rejoindre par un alignement presque droit, satisfaisant à la pente limite et à l'équivalence entre les déblais et remblais; mais il en résulterait des mouvements de terre énormes en levées et tranchées. Il est préférable alors de dévier la route sur le coteau, de manière à suivre à fleur du sol déclive une pente égale à la pente limite, avec le minimum de développement possible. Si l'on conçoit que le terrain soit découpé par tranches horizontales $Lm$, $L'm'$ ... $L'''m'''$ équidistantes, projetées sur un plan horizontal; et qu'entre les points extrêmes susdits, A et B, on imagine une suite de lignes, GH, HI, IK, représentant, en même projection, les pentes limites d'une courbe à l'autre, successives, ou marchant en zigzags; il est prouvé que la condition du *minimum du développement* sera satisfaite, si le produit des cosinus des angles que font *ces lignes* avec les courbes horizontales en regardant du point d'arrivée vers le point de départ, est égal au produit des cosinus des angles opposés que font les mêmes lignes avec les mêmes courbes en regardant du bas vers le haut; c'est-à-dire qu'on a $\cos. r, \cos. r', \cos. r'' \ldots \cos. pr^{n} = \cos. \mu, \cos. \mu' \ldots \cos. \mu^{n}$. La démonstration en a été donnée par M. Brisson, et par M. l'Ingénieur Mery jeune.

Figures 113 des planches.

Si les versants du coteau sont des plans inclinés, la condition précédente sera remplie lorsque les lignes du tracé aboutissant aux points extrêmes A et B seront parallèles entre elles en projection horizontale.

Si entre les points extrêmes A et B il n'y a qu'une seule zône de terrain en pente, les lignes du tracé KA et GB qui y aboutissent doivent, non-seulement

être parallèles entre elles en projection horizontale, mais de plus être ou normales aux projections des courbes horizontales formant les limites supérieure et inférieure de cette zône, ou parallèles aux projections horizontales de la *pente limite*. Dans l'un et l'autre cas, le tracé de la route ne se composerait que de deux lignes extrêmes et d'une intermédiaire réunissant leurs aboutissements sur les courbes horizontales limites. Figures 114 des planches.

Si les points extrêmes A et B sont séparés par deux coteaux et une plaine intermédiaire, on choisit un point auxiliaire C dans celle-ci, et l'on cherche, d'après les méthodes précédentes, le tracé de longueur minimum entre A et C, et C et B; ces deux tracés se rencontrent généralement suivant un angle au point C; et il faut, par des procédés graphiques, trouver la position du point auxiliaire C pour laquelle cet angle serait nul. Figures 115 des planches.

Enfin, si entre les points extrêmes A et B il y avait à franchir un ou plusieurs cours d'eau, par *des directions perpendiculaires au fil de l'eau, et d'une longueur déterminée*, il devrait y avoir parallélisme entre les lignes extrêmes AF et BC du tracé, et celles intermédiaires DE de raccordement avec les directions normales FE et DC aux cours d'eau. On pourrait résoudre par le calcul et par la géométrie descriptive, plusieurs autres problèmes de ce genre. Figures 116 des planches.

En général, il est avantageux de placer les routes à mi-côte, afin qu'une moitié soit en déblais et l'autre en remblais, et que l'on se trouve à zéro du terrain; parce qu'il y a équivalence et minimum de transport pour les déblais et remblais. Cette disposition force souvent de suivre les anfractuosités du revers d'une montagne, et de composer l'alignement de la route de lignes courbes rentrantes et saillantes.

Les rampes les plus douces doivent être employées dans les alignements curvilignes, et surtout dans les routes en *lacet* ou *zigzag*. Elles servent alors de paliers sur lesquels les voitures peuvent s'arrêter sans danger. Il est aussi d'usage de varier les pentes dans une grande montée, en plaçant les plus roides dans le bas : les animaux de trait paraissent soulagés par cette disposition, qui répartit les efforts sur les divers muscles. Toutefois, comme tout changement d'allure et de vitesse cause une perte de force vive, la pratique ci-dessus n'est applicable que sur des développements de rampes très-étendus.

Les intérêts généraux du commerce réclament qu'entre deux points de sujétion l'on évite autant que possible les montées et descentes alternatives, parce qu'il en résulte à la fois allongement de trajet et difficultés plus

grandes; toutefois si les pentes ou rampes sont *au-dessous des limites indiquées*, il s'établit quelquefois par les descentes une espèce de compensation de la fatigue des montées.

**Travaux préliminaires à la redaction et à l'exécution d'une route.**

Après cet exposé sommaire des principales considérations à envisager dans la rédaction d'un projet de route, on va indiquer les opérations sur le terrain et dans le cabinet, qui s'y rapportent.

Lorsque les enquêtes préalables sur l'opportunité, la convenance et la direction principale d'une route nouvelle ont été faites, et ont déterminé: les principaux *points de sujétion* par lesquels la route doit passer; les limites extrêmes de la largeur de la voie; le maximum de pente des rampes et descentes; alors commence le travail spécial de l'Ingénieur pour le tracé de la route entre ces points de sujétion primitifs.

Un préliminaire indispensable est la reconnaissance détaillée de la zône de terrain comprise entre ces points, à l'aide des cartes de Cassini ou de cartes topographiques plus récentes. A défaut de ces cartes, il faut lever un plan général de l'espace, où l'on présumera que seront renfermées les diverses combinaisons à étudier, et effectuer également un nivellement sommaire des principaux creux et reliefs du terrain. A l'aide de ces premiers documents on parviendra à trouver d'autres *points de sujétion*, intermédiaires aux primitifs, tels que les cols ou passages de montagnes, des traversées de rivières à effectuer; des étangs ou marais, des terrains d'une expropriation difficile et coûteuse, des déblais difficiles dans le rocher, etc., etc., à éviter. En procédant ainsi par *voie d'exclusion* on pourra resserrer de beaucoup le champ des investigations, et subdiviser la rédaction d'un projet unique en celles de divers projets partiels.

Cela fait, on tracera sur le terrain la ligne droite réunissant les points de sujétion successifs, et l'on fera le plan et le nivellement détaillé, en prenant un instant cette ligne *pour base d'opération*; c'est-à-dire qu'on effectuera d'abord un nivellement longitudinal suivant cette ligne, auquel on rattachera des profils transversaux, également levés et nivelés à droite et à gauche; le plan indiquera, à défaut des plans parcellaires du cadastre, la nature des terrains, édifices, les limites des propriétés, les noms des propriétaires, etc., etc.

Après avoir étudié les diverses combinaisons possibles avec une direction rectiligne entre les points de sujétion de départ et d'arrivée, l'on discutera les combinaisons possibles qui se rattacheront à des directions *brisées* ou *curvilignes* à droite et à gauche de la base d'opération; et c'est

ainsi que, par une suite d'hypothèses débattues sur les plans et profils, et particulièrement sur le terrain, l'on parviendra à découvrir, dans chaque cas particulier, le tracé qui présentera la plus grande somme d'avantages avec la moindre somme d'inconvénients. Dans les contrées peu accidentées on arrivera assez promptement au résultat.

---

## RÉSUMÉ DE LA SEIZIÈME LEÇON.

TRACÉ DES ROUTES ET DE LEURS RACCORDEMENTS. — OPÉRATIONS DE NIVELLEMENTS. — CALCULS DES COTES ROUGES EN LONG ET EN TRAVERS. — CUBATURE DES SOLIDES DE DÉBLAIS ET DE REMBLAIS. — TABLEAUX D'INSCRIPTION DES SOLIDES. — MODE D'EXÉCUTION DES ROUTES.

---

### *Tracé des routes et de leurs raccordements.*

C'est maintenant le lieu de parler des instruments et des procédés nécessaires aux opérations sur le terrain.

Le tracé d'une ligne droite se fait au moyen de jalons. Si les points extrêmes sont donnés, on fichera en terre les jalons intermédiaires en les *bornoyant* à la vue simple ou avec des lunettes. Si, après avoir tracé un très-long alignement, on ne retombe point exactement sur les points extrêmes, il faut mesurer l'écartement total, et déplacer du même côté les jalons intermédiaires, proportionnellement à leur distance à cette extrémité. Lorsque les deux bouts d'un alignement ne sont pas visibles simultanément, l'on a recours à des procédés trigonométriques connus.

Pour le tracé des alignements courbes qui, en projection horizontale, sont circulaires ou paraboliques, ainsi qu'on l'a déjà dit; on se sert de diverses méthodes, qui consistent la plupart en *intersections* de lignes droites. Voici les plus usitées.

### *Méthodes graphiques de raccordements d'alignements.*

Divisez SAB en plusieurs angles égaux; marquez au graphomètre placé en A les intersections des côtés A 1, A 2, etc., de ces angles avec l'alignement SB; répétez les mêmes opérations du point B; puisque Première méthode.

Figures 117 des planches.

l'angle SBA est égal au premier SAB, la courbe devant être un arc de cercle, l'intersection des lignes qui forment des angles égaux, comparés dans un ordre inverse, donnera évidemment des points de la courbe qui est un arc de cercle; car par cette construction, chaque angle, à la circonférence en M et M' sous-entendu par la même corde AB, est d'un nombre égal de degrés.

Deuxième méthode. — Figures 118 des planches.

Divisez AB en deux parties égales; menez CS; partagez SA en deux; menez S'S" parallèle à AB; cette ligne coupera SC en un point M qui sera sur la courbe. Faites les mêmes opérations dans le triangle AS'M, vous aurez un nouveau point M', ainsi de suite dans autant de triangles qu'on voudra former, tant du côté AC que de l'autre CB, et qui donneront autant de points à la courbe.

Dans cette seconde méthode, AS peut être ou n'être pas égal à BS. Dans tous les cas, la courbe est une parabole rapportée à son axe, quand AS=SB.

Cette courbe a l'avantage d'avoir peu de courbure à mesure qu'elle s'éloigne de son sommet, et par conséquent le passage de la courbe à l'alignement droit est peu sensible.

Troisième méthode. — Figures 119 des planches.

Divisez AS et SB chacun, en pareil nombre de parties égales entre elles. Joignez ensuite chaque division de BS en remontant et y compris le point B, avec chaque division correspondante de AS en descendant et y compris le point A; les intersections successives de toutes ces droites, prises deux à deux dans l'ordre qu'on vient d'indiquer, appartiendront à une courbe qui sera tangente aux alignements AB et SB aux points A et S.

Cette troisième méthode, qui donne également une parabole, est plus simple et d'une exécution plus facile que les précédentes.

Le raccordement de deux alignements consécutifs doit avoir un développement tel, que les roues des voitures, dans toutes les directions de la marche, trouvent toujours un point d'appui sur la chaussée.

Lorsque le tracé général de la route est terminé, on assure par de forts piquets les extrémités des alignements arrêtés, et par de moindres piquets les points d'alignements intermédiaires. On les *butte* avec de la terre, et même quelquefois on les enveloppe d'un massif de maçonnerie lorsque leur importance l'exige.

Les alignements courbes ne se tracent qu'au moment de l'exécution.

Les raccordements entre deux alignements droits consécutifs, en pays

de montagnes, sont bien plus fréquents que dans les routes en plaine.

On les exécute par la troisième méthode, qui est particulièrement applicable aux routes en pays de montagnes.

*Exemple de ce raccordement à inflexion.*

Soit ASS'*a* le zigzag formé par le tracé qu'on propose de raccorder par une courbe à inflexion, et soit B le point déterminé pour l'inflexion. Figures 120 des planches.

On appliquera aux deux angles S et S' les procédés de raccordement de la troisième méthode.

Ces moyens pratiques de tracer une courbe d'arrondissement ne sont pas toujours susceptibles d'être employés directement en pays de montagnes, à cause d'obstacles, qui ne permettent pas l'opération de division du côté de l'angle, et le tracé des lignes dont l'intersection doit produire la courbe cherchée.

On leur substitue avec avantage une méthode de tâtonnement, que l'expérience et l'habitude rendent expéditive, et d'où il résulte une courbe assez agréable, et qui remplit les conditions du problème.

Cette méthode consiste : à tracer des cordes successives formant un polygone inscrit dans l'angle à arrondir; et à placer sur le terrain, à l'extrémité de ces cordes prolongées également au delà du polygone, des flèches évaluées arbitrairement et qu'on augmente ordinairement, de manière à ce que le polygone qui en résulte passe par les points qu'on a déterminés.

Les figures 121 des planches indiquent la pratique de ce procédé sur le terrain. Figures 121 des planches.

Soit l'angle BSA formé par deux portions d'alignements d'un tracé au niveau de pente, qu'on propose d'arrondir par la méthode du tâtonnement.

On porte de A en A' sur le côté AS une longueur constante AA' de 10 mèt., par exemple; du point A', et d'un rayon égal à A'A on porte sur l'arc A'*m* la corde A*m* jugée nécessaire; on prolonge ensuite A*m* jusqu'en *n'* en faisant *mn'* égal à la quantité AA', et l'on tire du centre *m* et d'un rayon égal à *mn* l'arc *nn'*, que l'on fait égal à l'arc précédent, ou moindre, ou enfin plus grand si l'on s'aperçoit que la courbe demande à avoir plus ou moins de courbure. On continue les mêmes opérations jusqu'à ce que l'on soit parvenu au point B.

Il est rare qu'on réussisse à tracer du premier coup la courbe cherchée; mais les augmentations ou diminutions des flèches se font avec facilité, et avec un peu d'habitude on obtient, après une ou deux tentatives, le polygone qui donne un arrondissement convenable.

Cette méthode pourrait s'appliquer aux raccordements en pays de plaines; mais, pour éviter le tâtonnement qui en résulte, il vaut mieux, lorsque des obstacles ne s'y opposent pas, employer les méthodes graphiques précédemment enseignées.

Mesurage des lignes sur le terrain.

Pour le levé des plans, le mesurage des lignes se fait, soit avec des chaînes métriques en fer ou cuivre, soit avec de longues règles étalonnées, maintenues horizontales par des niveaux de maçon ou autres. Le mesurage des angles se fait, pour les points principaux éloignés, soit avec le graphomètre à pinnules ou à lunettes, soit à la boussole; et pour les détails, avec la planchette et l'équerre d'arpenteur. L'on trouvera dans les traités d'arpentage et de topographie la description détaillée de ces instruments et la manière de s'en servir avec précision.

### *Nivellement.*

Le nivellement pour des points culminants, qui sont à des hauteurs différant de plus de 100 à 150 mètres, peut se faire avec une exactitude suffisante à l'aide du baromètre portatif, et d'après les formules insérées par M. de Prony dans ses *Leçons de mécanique analytique*, ou d'après celles qui sont insérées tous les ans dans l'*Annuaire du bureau des longitudes*.

Pour des différences de hauteur moindres entre les points saillants des reliefs, l'on peut encore recourir aux observations trigonométriques, qui donnent à la fois les hauteurs et les distances horizontales.

Pour des dénivellations moindres encore, et pour des points éloignés de plus de 60 mètres, il faudra recourir au *niveau à bulle d'air*, en ayant soin d'établir sa plate-forme de manière qu'elle reste horizontale et à la même hauteur dans le mouvement de rotation de l'instrument. Puis on prendra suivant la méthode de M. l'Ingénieur Egault, la moyenne des quatre observations faites par un même coup de niveau : 1° l'observation ordinaire et directe; 2° en donnant un demi-tour à l'instrument sur ses *collets*; 3° en renversant la lunette bout pour bout, et faisant faire à la fois un demi-tour de révolution à l'instrument sur son pivot; 4° en donnant également dans cette position un demi-tour à la lunette sur ses collets.

Enfin pour les nivellements où l'instrument est à moins de 30 mèt. des points à relever, l'on emploie le niveau d'eau ordinaire; mais comme cet instrument perd quelquefois l'eau; que la capillarité y rend incertaine la

position du niveau de l'eau, *surtout dans deux fioles d'inégale grandeur*; enfin qu'il est très-inexact lorsqu'il fait du vent, on peut lui substituer le niveau à pinnules et bulle d'air de M. Lefranc, approuvé par la société d'encouragement.

Tous ces instruments ne donnent que le niveau *apparent*, c'est-à-dire une tangente à la courbure de la surface de la terre; or, pour une distance de 1,000 mètres, le niveau vrai est au-dessous du niveau apparent de 151 millim. Il y a, du reste, des tables qui donnent ces abaissements pour la série des diverses distances horizontales; mais dans les nivellements pour les travaux des routes, on aura rarement des corrections de ce genre à faire, parce que l'instrument ne sera jamais très-éloigné du milieu de l'intervalle des deux points à comparer.

Pour les points très-rapprochés, on se sert de règles et de niveaux de maçon ou d'équerres en fer avec fil à plomb. L'on emploie en Asie, pour des nivellements qui n'exigent pas beaucoup de précision, un procédé fort simple, qui consiste à tendre entre deux jalons, toujours espacés de la même distance, une corde ou fil de fer flexible attachée toujours aux mêmes points des jalons, et à faire descendre au point le plus bas un poids porté par une poulie ou anneau très-mobile.

Les niveaux divers ci-dessus sont d'un usage pénible dans les terrains accidentés et très-abruptes, et pour trouver *la pente par mètre* l'on est forcé de faire deux opérations, celle du mesurage des distances, et l'observation des hauteurs.

On leur substitue alors le *niveau de pente à bulle d'air*, qui est susceptible d'une grande précision, et qu'on appelle *éclimètre* ou *clinomètre*. La ligne de mire est variable depuis zéro, qui est la ligne horizontale, jusqu'aux plus fortes rampes qui peuvent être employées. Niveau de pente.

La variabilité s'obtient par une pinnule mobile dans le sens vertical, qui donne les tangentes des angles de pente par une graduation dont les subdivisions sont marquées avec exactitude par un *vernier*. La ligne de mire est la sécante des divers angles de pente.

D'autres instruments du même genre ont été imaginés depuis; le théodolite est le plus perfectionné de tous.

Les instruments à pente donnent le moyen d'essayer promptement et successivement plusieurs tracés qui côtoieraient une montagne de différentes manières.

En effet, l'on place l'instrument au point de départ dans la vallée, et de

manière à apercevoir le point d'arrivée sur le revers de la montagne, alors l'on élève la pinnule mobile en la dirigeant sur ce dernier point; on peut juger de suite si la rampe indiquée par l'instrument convient ou non au projet. Tandis qu'avec les niveaux ordinaires il faudrait chercher péniblement tous les points du terrain qui seraient à une distance déterminée, puis choisir parmi eux, ceux qui seraient à la différence de niveau qu'on voudrait réaliser.

Quel que soit l'instrument employé pour les nivellements de détail, cette opération est régularisée comme il suit :

Relevé des nivellements.

Chaque station compare au moins deux points du terrain dans un nivellement en longueur, c'est-à-dire suivant l'axe longitudinal d'une route; l'un est appelé *coup de niveau d'avant*, l'autre *coup de niveau d'arrière*. Les autres observations, s'il y en a, se nomment *coups intermédiaires*.

Chaque station forme un nivellement simple.

Un nivellement qui résulte de plusieurs stations successives est un nivellement composé. Chaque partie du nivellement simple s'attache au nivellement composé, par le coup d'arrière qui se donne sur le même point qui a fait l'objet du coup d'avant de la station précédente, et qui, par conséquent, établit la relation de position entre ces deux stations.

Dans une même station on prend tous les points intermédiaires qui sont nécessaires au projet.

On enlève ensuite l'instrument, et on le porte vers le milieu de l'intervalle qui constitue la deuxième station.

Il est évident qu'il n'est pas nécessaire de placer l'instrument dans l'alignement. Les rayons visuels étant toujours dans un plan horizontal, ils déterminent, par rapport à ce plan, les abaissements respectifs des points du terrain, quelle que soit la position du niveau.

Il est nécessaire d'observer un certain ordre dans la tenue du brouillon du nivellement qui se fait sur le terrain, afin d'éviter les erreurs.

L'usage adopté dans les ponts et chaussées à cet égard est : d'inscrire les *cotes* des diverses hauteurs, en les *adossant* à des perpendiculaires qu'on a tracées sur l'horizontale qui indique la ligne de niveau; celle d'arrière et celle d'avant sont placées dans la même case, l'une à droite, l'autre à gauche de chaque perpendiculaire. Ainsi chaque point extrême d'une station ou ni-

vellement simple se trouve doublement coté. Les coups intermédiaires ne portent qu'une seule cote.

On figure au-dessous des perpendiculaires les *anfractuosités* ou plis du terrain. Cette précaution tend à éviter les erreurs.

Sur la ligne horizontale on place, entre chaque perpendiculaire, la distance horizontale qui les sépare.

Les figures 122 des planches représentent un brouillon ou minute de nivellement en longueur, avec les profils en travers correspondants. Figures 122 des planches.

Il est évident qu'il est nécessaire de réduire à une seule les diverses stations dont se forme un nivellement composé. Cette réduction a lieu au moyen de l'opération qui se nomme *rapporter un nivellement*.

Par cette opération, qui est un travail de cabinet, on rapporte les profils à deux axes différents, et l'on obtient pour résultat une coupe verticale du terrain sur lequel passe la directrice.

Pour rapporter un nivellement, on commence par soustraire de la plus forte la plus faible des cotes d'arrière et d'avant. La différence est affectée du signe *plus* si la première est moindre que la seconde, et du signe *moins* dans le cas contraire.

Ces différences sont écrites horizontalement avec leur signe sur le brouillon du nivellement; elles sont placées dans chaque case formée par les perpendiculaires qui leur sont relatives.

Le nivellement ainsi préparé sur le brouillon, on adopte, pour déterminer la position du premier point de nivellement au-dessous de l'horizontale, une *cote d'emprunt* telle, qu'elle puisse fournir à la soustraction de la somme de toutes les cotes montantes, afin que tout le nivellement puisse être soumis à cette ligne horizontale. Toutes les cotes suivantes se composent de la première, modifiée en plus ou en moins par les différences successives. Elles s'écrivent ordinairement en noir : on les nomme *cotes au terrain*, par opposition à celles dites *cotes au projet* que l'on écrit *en rouge* et dont nous parlerons bientôt.

On construit les lignes du terrain d'après ces nouvelles cotes, et le nivellement est rapporté.

Lorsqu'on ne veut connaître que la position respective des deux points extrêmes d'un nivellement composé, il est inutile de le rapporter, en construisant les lignes du terrain; on se contente de faire la somme des différences de chaque signe; on soustrait le moindre résultat du plus grand; et suivant que la différence est positive ou néga-

tive, on a la quantité dont le dernier point est au-dessous ou au-dessus du premier.

Tout nivellement, même pour les projets de route qui n'exigent pas une précision aussi rigoureuse que ceux qui sont relatifs aux projets de canaux et d'autres ouvrages hydrauliques, a besoin d'être vérifié.

Pour la vérification des nivellements relatifs aux projets de route, on se contente de les recommencer à grands coups de 2 ou 300 mètres de distance, sans mesurer les intervalles; et si l'on trouve un résultat à 2 ou 3 décimètres près, conforme à celui du premier nivellement, on en conclut que l'opération est suffisamment exacte.

Il faut prendre autant de profils en travers que le demandent les localités : ces profils ont un point commun avec celui en longueur, et en ajoutant ou retranchant les différences des points observés à droite ou à gauche de la directrice, on obtient la position du terrain dans toute l'étendue du profil en travers.

Ces profils en travers sont désignés par des numéros qui font voir leur correspondance avec les profils en long.

On a soin d'ailleurs de relever, en faisant l'opération des nivellements, les sondes qui donnent la nature du terrain; enfin l'on ne doit négliger aucun des renseignements qui peuvent ultérieurement servir à la solution la plus avantageuse des projets.

Ce sont les profils en travers qui, pris deux à deux, établissent le relief du terrain, d'où il résulte que, d'un profil à l'autre, le terrain est divisé en plusieurs bandes *polyèdres à faces gauches*, engendrées par le mouvement d'une droite parallèle au plan vertical passant par l'axe de la route, et dont les extrémités s'appuient sur les lignes de terrain données par les profils en travers.

Telle est la génération du terrain adoptée ordinairement pour faciliter les opérations ultérieures.

Cette génération hypothétique du terrain est différente de celle imaginée par le célèbre Monge et par l'Ingénieur Meusnier, pour la solution graphique du problème de défilement. En effet le terrain y est représenté par des sections horizontales faites à différentes hauteurs, et figuré par des courbes qui embrassent toutes les cotes d'une dimension égale.

Cette marche était nécessaire pour l'objet que l'Ingénieur Meusnier se

proposait; mais celle adoptée pour les projets de route, quoique moins rigoureuse, est suffisamment exacte relativement au résultat.

Les profils en travers sont toujours perdendiculaires à la directrice; ils doivent être en assez grand nombre, et tellement placés qu'on ne puisse désirer une cote intermédiaire à deux profils pour la représentation exacte du terrain.

La recherche de l'égalité du déblai ou du remblai, dans un projet de route, n'est pas un problème susceptible d'être rigoureusement résolu par la géométrie.

Cependant la considération de l'effet des pentes projetées sur le profil en long, relativement aux déblais et remblais qui en résultent, fournit ordinairement des indications suffisantes pour déterminer la position provisoire de ce profil.

On embrasse à la fois un certain nombre de profils; on modifie cette idée par un examen attentif des résultats susceptibles d'être aperçus au premier coup d'œil; enfin on dispose le mieux possible un système de pentes qui puisse convenir au terrain, en ayant égard à toutes les autres conditions d'économie dans les terrassements, et de facilité pour le roulage.

Pour suppléer au défaut de principes rigoureux à cet égard, on a essayé un projet de pentes, en indiquant les motifs de leur détermination sur une portion du nivellement, dont la minute est rapportée (fig. 123 des planches). Figures 123 des planches

*Calculs des cotes rouges.*

La marche à suivre pour déterminer les pentes et les cotes rouges qui en résultent, et qui indiquent le déblai et le remblai, est très-facile; elle n'exige qu'un peu d'attention, et chacun peut se faire une méthode qui lui soit propre. Je vais indiquer celle qui est généralement suivie dans les ponts et chaussées. Ces cotes rouges sont ainsi nommées, parce qu'il est d'usage de les écrire avec de l'encre rouge, pour les distinguer des cotes du terrain, qui sont toujours en noir.

La pente ou rampe par unité de mesure en longueur est donnée par la pente absolue divisée par la longueur de la rampe. On obtient la pente ou rampe absolue par la soustraction de la plus grande des cotes extrêmes du projet de la moindre.

Chaque cote rouge est déterminée par la comparaison de chaque cote du

nivellement ou du terrain, avec les nouvelles cotes du projet. On obtient ces dernières en ajoutant ou soustrayant, suivant les dispositions du terrain par rapport au projet, des quantités qui sont toutes connues.

Figures 123 des planches.

Un exemple du calcul d'une rampe et des cotes rouges qui en résultent, appliqué à la portion du nivellement en longueur qui fait l'objet de la figure 123 des planches, sur laquelle la ligne de rampe projetée A'B' est tracée, expliquera la méthode exposée ci-dessus.

Les cotes rouges des deux points extrêmes sont en { A' = 4,62 ; B' = 0,89 } et supposées en remblai.

| | | |
|---|---|---|
| La longueur de la rampe | = | 48$^m$ |
| La rampe totale ou absolue | = | 1,64 |
| La rampe par mètre | = | 0,034 |
| La cote du projet au point A | = | 6,38 |
| A soustraire pour la quantité dont le projet a monté jusqu'en M'=0,034×15 | = | 0,51 |
| Ainsi la cote du projet au point M' | = | 5,87 |
| Celle du terrain est de | = | 9,16 |
| La différence entre ces deux cotes, donne la cote rouge au point M' | = | 3,29 |

Elle indique un remblai, puisque la cote du terrain est plus forte que celle du terrain.

La marche, extrêmement simple, est la même pour trouver les cotes rouges des points N et B suivants.

La rampe et les cotes ayant été ainsi trouvées, elles sont écrites définitivement en rouge, lorsque le résultat d'une ligne de rampe ou de pente est reconnu satisfaire le mieux possible aux conditions exigées et aux principes qu'on a établis; ces cotes rouges verticales étant écrites tant sur le profil longitudinal que sur les profils en travers, le projet est arrêté, et l'épure est disposée à recevoir les autres cotes rouges horizontales nécessaires pour le calcul des terrasses.

Revenons aux corrections à apporter à un tracé, au niveau de pente, d'une route en pays de montagnes.

On a dit qu'il falllait rattacher au tracé primitif, par un nivellement fait avec le niveau d'eau, les points qui s'en écarteraient, afin d'obtenir, dans

certaines parties, des courbes plus agréables, ou pour éviter des obstacles, et quelquefois pour placer convenablement un pont ou un aqueduc sur un ravin qu'il faut franchir.

Après avoir tracé sur le terrain, par les méthodes précédemment enseignées, les courbes qui satisfont aux rectifications adoptées; l'usage ordinaire est de rapporter sur un profil particulier ces portions du projet rectifiées, et de faire ensuite, dans le cabinet, sur ces nivellements partiels, les opérations et les calculs pour la détermination des pentes, et pour trouver les cotes rouges.

Mais on peut aussi, et cela vaut mieux, se dispenser de ce travail de cabinet, et déterminer les pentes et obtenir les cotes rouges des parties du tracé rectifiées, sur le terrain même et tout en faisant l'opération du nivellement. Cette méthode, qui abrége le travail de l'ingénieur, a, en outre, l'avantage de lui faire connaître sur-le-champ les quantités de terrassements qui résultent de ces rectifications, et par conséquent de lui montrer si elles sont admissibles, ou s'il faut les rejeter pour en essayer d'autres plus économiques.

La méthode et l'ordre de cette opération sont indiqués sur le tableau suivant : il présente la formule et toutes les données dont on a besoin pour trouver, au moyen de simples additions ou soustractions, les cotes rouges pour tous les points du nouveau tracé. Ce nivellement partiel est celui rapporté (figures 122 des planches). La concordance des cotes rouges trouvées par cette méthode avec celles calculées ci-dessus, établit l'exactitude de la formule, dont au reste il est facile de se rendre compte dans toutes les circonstances de position du projet par rapport au terrain. Figures 122 des planches.

La formule pour trouver la cote rouge suivante, est $(A \pm P \pm C) - B = C'$. C est la cote rouge du coup d'arrière; C' est la cote rouge cherchée. A est le coup de niveau arrière, et B le coup de niveau avant.

Les signes qui affectent les quantités P et C doivent être pris ainsi :

Pour P { + lorsque c'est une pente.
— lorsque c'est une rampe.

Pour C { + dans le cas de déblais.
— dans le cas de remblais.

*Tableau imdicateur des pentes et des cotes rouges du nivellement en longueur.*

| NUMÉROS DES PIQUETS. | DISTANCE entre les piquets. | Rampes — Pente + pour la distance totale ci-contre. | ±C Déblais + Remblais — à l'extrémité ; origine de la pente ou rampe, ou cote rouge à cette extrémité. | COUPS DE NIVEAU de chaque station partielle. Arrière. A | Avant. B | Formule C' ou cote à chercher, =(A ± P ± C) — B en observant de prendre les quantités avec les signes, d'après les indications ci-contre. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | » | 0. 0 | — 4.62 | » | » | |
| 2 | 15 | 0.51 | — 3.29 | 2.56 | 0.72 | |
| 3 | 15 | 0.51 | + 2.36 | 6.26 | 0.10 | |
| 4 | 18 | 0.61 | — 0.88 | 0.89 | 3.52 | |

## *Cubature des solides de déblai et de remblai.*

L'épure d'une route est un figuré supplétif du plan : elle détermine les formes et les dimensions des solides de déblai et de remblai.

Les arêtes, et par conséquent les faces supérieures et inférieures des solides appartiennent à la surface du projet et à celle du terrain.

La section de ces deux surfaces donne ce qu'on appelle les *points de passage.*

Les points de passage trouvés pour les arêtes qui limitent ces surfaces, doivent être liés entre eux, deux à deux. Ces lignes détermineront les limites du déblai au remblai, et réciproquement.

Chaque point de passage est fixé par sa distance horizontale, à la projection du profil en travers choisi pour sa détermination.

Ces distances en longueur forment, avec les largeurs données, par les profils en travers, ou par des points de passage en travers, des dimensions qui sont perpendiculaires les unes aux autres, et qui sont les bases des solides qui forment les déblais ou les remblais. Les cotes rouges verticales donnent la troisième dimension perpendiculaire de ces solides.

Pour trouver un point de passage, il faut connaître la rampe du terrain, celle du projet, et la distance verticale qui les sépare.

Les cotes rouges du profil en longueur doivent donc être trouvées les premières.

Après les avoir placées d'abord sur le profil en longueur, on les reporte sur le profil en travers au point correspondant.

Ce point déterminé suivant l'échelle, on pose et l'on trace le profil en travers de la route, au moyen *d'un panneau.*

On achève ensuite de calculer les cotes rouges du profil en travers.

Chaque cote rouge en travers est la cote de l'axe de la route, modifiée en plus ou en moins, suivant les accidents du terrain et la loi des pentes adoptées pour les diverses parties qui la composent.

Les distances horizontales, ou *cotes rouges horizontales,* se trouvent par des formules qui seront données ci-après, et qui abrègent les calculs et dispensent des raisonnements qu'il faudrait faire pour trouver ces cotes sans le secours de ces formules.

Un exemple de ce calcul des cotes rouges du profil en travers, est appliqué à quelques points de la partie droite du profil, figures 124 des planches. Figures 124 des planches.

Il faut trouver des cotes rouges pour toutes les parties dont se compose le profil en travers de la route, et à tous les plis du terrain.

La formule pour trouver la distance horizontale des points de passage $mM$ ou $x=\frac{PT\times AB}{S}$, est facile à démontrer; elle est fondée sur la similitude des triangles dont cette figure est composée. Figures 125 des planches.

PT est la cote rouge à gauche; S est la somme des deux cotes PT et ER, et AB la distance horizontale.

La démonstration de la formule pour trouver la distance horizontale de la rencontre des deux talus ou ligne de pente dont on connaît la loi n'est pas moins facile.

Premier cas. Lorsqu'un talus monte et que l'autre descend, LC ou $x=\frac{AT}{P-p}$, AT étant la cote rouge; P est la pente du projet, et $p$ la pente du terrain. Figures 126 des planches

Second cas. Lorsque les talus vont dans le même sens, LC ou $x=\frac{AT}{P-p}$. Figures 127 des planches.

Les lettres indiquent les mêmes choses que dans le premier cas.

Le nivellement ainsi préparé, on a toutes les dimensions nécessaires pour calculer les solides de déblai et de remblai.

D'après la génération hypothétique adoptée, du terrain et du projet, tout solide compris entre deux profils du projet, aura un plan pour sa base.

Ces solides sont divisés suivant leur longueur par des plans verticaux

parallèles. Si les quatre coles rouges correspondantes deux à deux sur deux profils en travers consécutifs, sont toutes en déblai ou en remblai, les solides seront relatifs à cette circonstance et de l'espèce indiquée par la nature des coles; leur base sera un quadrilatère.

Si les cotes correspondantes sont les unes en déblai et les autres en remblai, alors il y a solide de déblai et solide de remblai. Les bases sont ordinairement des trapèzes; la ligne formée par le lieu des points de passage, est le côté qui n'a point de parallèle; on a aussi quelquefois deux solides, dont l'un à base de trapèze, et l'autre à base de triangle.

Tel est le résultat général de la décomposition des solides entre deux profils.

Pour calculer ces solides, on les divise en trois espèces, eu égard à leur base.

B est la surface de la base.
H, H', H'', H''' sont les hauteurs.
S est la solidité.

Figures 128 des planches.

La première espèce comprend les solides à base de triangle. Elle peut avoir une, deux ou trois hauteurs; dans ce cas la formule est

$$S = B \times \frac{H+H'+H''}{3}.$$ (Fig. 128 des planches.)

Figures 129 des planches.

La seconde, à base de quadrilatère. Elle peut avoir une, deux, trois ou quatre hauteurs; dans ce cas la formule est

$$S = B \times \frac{H+H'+H''+H'''}{4}.$$ (Fig. 129 des planches.)

La troisième, à base de trapèze. On la divise en deux triangles, dont la base est B'+B''.

Deux cas : 1° quatre hauteurs égales, ou deux égales sur les côtés parallèles. Formule :

$$S = B' \times \frac{(H+H'+H'')}{3} + B'' \times \frac{(H'+H''+H''')}{3}.$$

Figures 130 des planches.

2° Quatre hauteurs inégales. (Fig. 130 des planches.) Formule :

$$S = B' \times \frac{(2H+2H'+H''+H''')}{6} + B'' \frac{(2H'''+2H''+H'+H)}{6}.$$

Dans la pratique, un alignement courbe est considéré comme sa tangente, et par conséquent comme un alignement droit. Le résultat, quoiqu'il ne soit pas rigoureux, est suffisamment exact pour l'objet dont il s'agit.

L'application de cette théorie à la décomposition de la partie à droite du profil et l'inscriptiou des facteurs des solides de déblai et de remblai correspondants, font l'objet du tableau qu'on trouvera ci-dessous.

M. l'Ingénieur en chef de Noel, dans une note insérée aux *Annales des ponts et chaussées* de 1836, a proposé de substituer aux méthodes ordinaires qu'on vient d'exposer, celle qui consisterait à remplacer la demi-somme des profils extrêmes par l'aire d'un profil pris au milieu de la longueur de chaque solide. M. de Noel démontre d'ailleurs que le cube exact est toujours représenté par $\frac{2C'+C''}{3}$, en appelant C' le cube donné par sa méthode, et C'' celui que fournit la méthode ordinaire.

L'administration des ponts et chaussées a fait dresser récemment des tables très-détaillées, qui, pour les profils de route les plus habituels, donnent immédiatement les cubes des déblais et remblais, suivant les pentes variables des lignes du terrai dans les profils en long et en travers. On épargne ainsi un temps considérable aux Ingénieurs et à leurs employés.

Au reste, le bas prix des déblais et des remblais; le peu d'influence qu'auraient sur un tracé des erreurs d'évaluations dans les cubages; les causes d'inexactitudes et d'erreurs bien plus graves qui tiennent à la nature variable des terrains à déblayer; doivent déterminer à recourir aux méthodes les plus courtes pour calculer sommairement les déblais et remblais, afin d'avoir plus de temps à donner aux autres questions plus essentielles du tracé des routes.

Distances moyennes des déblais aux remblais

On a dit, à propos des déblais et des remblais, que la distance moyenne des uns aux autres doit être un *minimum*. En règle générale cette distance moyenne dans chaque zône de travail est la distance horizontale des centres de gravité entre les portions correspondantes de déblais et de remblais, *augmentée de leur distance verticale*; en sorte qu'en faisant la somme des poids des déblais partiels multipliés par les distances correspondantes, et divisant par la somme totale des poids, on arrive aux distances moyennes générales tant horizontales que verticales.

Figures 131 des planches

Cependant cette règle est en défaut dans deux cas; 1° lorsqu'entre les déblais et les remblais il y a plusieurs points de sujétion, tels que ponts et autres, par lesquels les déblais doivent tous passer, et lorsque ces points ne sont pas situés sur la ligne de jonction des centres

de gravité; dans ce cas la distance moyenne dépend de la moyenne des tangentes qu'on peut mener des points de sujétion à la surface extérieure des déblais et des remblais; 2° lorsque les déblais sont sur un axe presque normal à celui où doivent être déposés les remblais. La distance moyenne est alors $\frac{d}{2}\sqrt{2m+1}$ : si l'on appelle $d$ la demi-longueur des remblais et $\frac{1}{m}$ le rapport de la longueur totale des remblais à celle des déblais.

Figures 132 des planches.

S'il y a deux points de sujétion entre la masse des déblais et celle des remblais, par lesquels on puisse passer à volonté, on déterminera les portions de déblais allant en remblais qui doivent passer par l'un et par l'autre de ces points, en les considérant comme les foyers d'un *hyperboloïde*, qui diviserait les masses de déblais et remblais en portions respectivement égales.

Figures 133 des planches.

Si une masse de déblais doit être répartie entre deux masses de remblais; il faudra prendre également les centres de gravité de ces deux dernières comme les foyers d'un hyperboloïde dont l'axe serait la ligne de jonction des centres de gravité; et cet hyperboloïde par son intersection avec la masse des déblais, séparerait ceux qui correspondraient à un foyer de ceux qui correspondraient à l'autre.

Figures 134 des planches.

Monge et M. le baron Charles Dupin ont traité analytiquement les questions de maxima et de minima relatives aux déblais et remblais.

*Exemple d'un tableau d'inscription des divers solides, ou calcul des terrasses d'une partie de projet de route relative à l'épure, figures 135 des planches.*

Figures 135 des planches.

| INDICATIONS. | DIMENSIONS. | SUPERFICIES. | CUBES EN remblai. | CUBES EN déblai. | OBSERVATIONS. |
|---|---|---|---|---|---|
| Du 18e au 19e PROFIL. | | | | | |
| *Première partie à droite de l'axe de la route.* | | | | | |
| ENCAISSEMENT. | | | | | |
| Trapèze A. . . . 1er triangle. . | Long. . . . m. 4,51 / Haut. . . . 1,65 | mq. 7,44 | | | |
| 2e triangle | Long. . . . 4,90 / Haut. . . . 1,61 | 7,89 | | | |
| | Largeur commune. . | 15,33 / 3,00 | mc. 45,99 | | |
| Trapèze A'. . . . 1er triangle. . | Long. . . . 2,99 / Haut. . . . 1,03 | 3,08 | | | |
| 2e triangle . . | Long. . . . 2,60 / Haut. . . . 0,9[illegible] | 2,42 | | | |
| | Largeur commune. . | 5,50 / 3,00 | . . . . . . | mc. 16,50 | |
| ACCOTTEMENT. | | | | | |
| Trapèze B. . . . 1er triangle. . | Long. . . . 5,52 / Haut . . . 1,92 | 10,60 | | | |
| 2e triangle . . | Long. . . . 6,03 / Haut. . . . 2,06 | 12,42 | | | |
| | Largeur commune. . | 23,02 / 1,00 | 23,02 | | |
| Trapèze B'. . . . 1er triangle. . | Long. . . . 1,98 / Haut. . . . 0,60 | 1,19 | | | |
| 2e triangle. . . | Long. . . . 1,46 / Haut. . . . 0,57 | 0,83 | | | |
| | Largeur commune. . | 2,00 / 1,00 | . . . . . | 2,02 | |
| Trapèze C. . . . 1er triangle. . | Long. . . . 6,03 / Haut. . . . 2,46 | 14,83 | | | |
| 2e triangle. . | Long. . . . 6,53 / Haut. . . . 2,78 | 18,15 | | | |
| | Largeur commune. . | 32,98 / 2,00 | 65,96 | | |
| Trapèze C'. . . . 1er triangle. . | Long . . . 5,46 / Haut . . . 0,51 | 0,74 | | | |
| 2e triangle. . | Long. . . . 0,96 / Haut. . . . 0,48 | 0,46 | | | |
| | Largeur commune. . | 1,20 / 2,00 | . . . . . | 2,40 | |
| *A reporter* . . . . . . . . . . . . | | | mc. 134,97 | mc. 20,92 | |

| INDICATIONS. | | DIMENSIONS. | SUPERFICIES | CUBES EN remblai. | CUBES EN déblai. | OBSERVATIONS. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | mc. | mc | |
| *De l'autre part.* . . . . . . . . . . . . | | | | 134.97 | 20,92 | |
| FOSSÉS ET TALUS. | | | | | | |
| Trapèze D. . . . | 1[er] triangle. | Long. ½ . . . 6.53 m.<br>Haut ½ . . . 3,07 | 20,05 mq. | | | |
| | 2[e] triangle . . | Long. ½ . . . 2,06<br>Haut. ½ . . . 3,07 | 18,60 | | | |
| | | Largeur commune. . | 38,65<br>0.66 | 25,51 | | |
| Trapèze D'. . . . | 1[er] triangle. . | Long. ½ . . . 0.96<br>Haut. ½ . . . 0,[illegible] | 0,52 | | | |
| | 2[e] triangle. . | Long. ½ . . . 1.44<br>Haut. ½ . . . 0,62 | 0,89 | | | |
| | | Largeor commuoe. . | 1.41<br>8.66 | . . . . . . | 0,93 | |
| Trapèze E. . . | 1[er] triangle. . | Long. ½ . . . 6 06<br>Haut. ½ . . . 3,06 | 18,54 | | | |
| | 2[e] triangle . . | Long. ½ . . . 5,84<br>Haut. ½ . . . 3,06 | 17,87 | | | |
| | | Largeur commune. . | 36,41<br>0,33 | 12,01 | | |
| Trapèze E'. . . . | 1[er] triangle. . | Long. ½ . . . 1.44<br>Haut. ½ . . . 0,72 | 1,04 | | | |
| | 2[e] triangle . . | Long. ½ . . . 1,33<br>Haut. ½ . . . 0,71 | 0,94 | | | |
| | | Largeur commone. . | 1,98<br>0,33 | . . . . . . | 0,65 | |
| Trapeze F . . . . | 1[er] triangle. . | Long. ½ . . . 5,84<br>Haut. ½ . . . 3,02 | 17,64 | | | |
| | 2[e] triangle . | Long. ½ . . . 5,70<br>Haot. ½ . . . 2,98 | 16.98 | | | |
| | | Largeur commune. . | 34,62<br>0,33 | 11,42 | | |
| Trapèze F'. . . . | 1[er] triangle. | Long. ½ . . . 1,33<br>Haot. ½ . . . 0,67 | 0 89 | | | |
| | 2[e] triangle . . | Loog. ½ . . . 1,16<br>Haot. ½ . . . 0,63 | 0,73 | | | |
| | | Largeur commune. . | 1,62<br>0,33 | . . . . . . | 0,53 | |
| Pyramide G. . . . | . . . . . . . . | Long. ½ . . . 5,70<br>Larg. . . . . 8,79<br>Haut. ⅓ . . . 1,11 | 50,10<br>1,96 | 98,20 | | |
| Pyramide G'. . . | . . . . . . . . | Loog. ½ . . . 1,16<br>Larg. . . . . . 1,03<br>Haot. ⅓ . . . . . . | 1,19<br>0.40 | . . . . . . | 0,47 | |
| | | *A reporter*. . . . . . . . . . . . . . | | 282,11 mc. | 27,60 mc. | |

| INDICATIONS. | | DIMENSIONS. | SUPERFICIES. | CUBES EN remblai. | CUBES EN déblai. | OBSERVATIONS. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *De l'autre part* | | | | mc. 282,11 | mc. 27,60 | |
| *2e partie; à gauche de l'axe de la route.* | | | | | | |
| ENCAISSEMENT. | | | | | | |
| Trapèze *a* | 1er triangle. | Long. ½ m. 3,06 / Haut. ½ 1,33 | mq. 4,07 | | | |
| | 2e triangle | Long. ½ 4,90 / Haut. ½ 0,93 | 4,56 | | | |
| | | Largeur commune | 8,63 / 2,00 | 17,26 | | |
| Trapèze *a'* | 1er triangle. | Long. ½ 4,44 / Haut ½ 0,91 | 4,04 | | | |
| | 2e triangle. | Long. ½ 2,99 / Haut. ½ 1,02 | 3,05 | | | |
| | | Largeur commune | 7,09 / 2,00 | ..... | 14,18 | |
| Pyramide *b* | ........ | Long. ½ 3,06 / Larg. 0,97 / Haut. ½ ... | 2,97 / 0,37 | 1,10 | | |
| Trapèze *b'* | 1er triangle. | Long. ½ 7,50 / Haut. ½ 0,64 | 4,80 | | | |
| | 2e triangle. | Long. ½ 4,44 / Haut. ½ 0,72 | 3,19 | | | |
| | | Largeur commune. | 7,99 / 0,97 | ..... | 7,75 | |
| Quadril. *cc'* | ........ | Long. 15,00 / Larg. 0,03 / Haut ½ ... | 0,45 / 0,57 | ..... | 0,26 | |
| ACCOTTEMENT | | | | | | |
| Pyramide *d* | ........ | Long. ½ 2,55 / Larg. 0,32 / Haut. ½ ... | 0,82 / 0,12 | 0,10 | | |
| Trapèze *d'* | 1er triangle. | Long. ½ 4,96 / Haut. ½ 0,34 | 1,69 | | | |
| | 2e triangle. | Long. ½ 7,50 / Haut. ½ 0,31 | 2,32 | | | |
| | | Largeur commune | 4,01 / 0,32 | .... | 1,28 | |
| Quadril. *ee'* | ........ | Long. 15,00 / Larg. 1,14 / Haut. ½ ... | 17,10 / 0,46 | ..... | 7,87 | |
| *A reporter* | | | | mc. 300,57 | mc. 58,94 | |

| INDICATIONS. | | DIMENSIONS. | SUPERFICIES. | CUBES EN remblai. | CUBES EN déblai. | OBSERVATIONS. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | mc. | mc. | |
| *De l'autre part.* . . . . . . | | | . . . . . | 300,57 | 58,94 | |
| | | m. | mq. | | | |
| Trapèze *f* . | 1er triangle. . | Long. ½ . . . 6,57<br>Haut. . . . 0,85 | 5,58 | | | |
| | 2e triangle . . | Long. ½ . . . 7,50<br>Haut. . . . 0,75 | 5,63 | | | |
| | | Largeur commune. . | 11,21<br>0,54 | . . . . | 6,05 | |
| Pyramide *f'* . | . . . . . . . . | Long. ⅓ . . . 0,93<br>Larg. . . . . . 0,54<br>Haut. ⅓ . . . . . . | 50,00<br>0,09 | 4,50 | | |
| Trapeze *g* . . | 1er triangle. . | Long. ½ . . . 5,49<br>Haut. . . . 1,01 | 5,54 | | | |
| | 2e triangle. . | Long ½ . . . 6,57<br>Haut. . . . 0,98 | 6,44 | | | |
| | | Largeur commune. . | 11,98<br>1,00 | . . . . . | 11,98 | |
| Trapèze *g'*. . . | 1er triangle. . | Long. ½ . . . 2,01<br>Haut. . . . 0,30 | 0,60 | | | |
| | 2e triangle. . | Long. ½ . . . 0,93<br>Haut. . . 0,22 | 0,20 | | | |
| | | Largeur commune. . | 0,80<br>1,00 | 0,80 | | |
| FOSSÉS ET TALUS. | | | | | | |
| Trapèze *h*. . . | 1er triangle. . | Long. ½ . . . 6,84<br>Haut. . . . 1,28 | 8,75 | | | |
| | 2e triangle. . | Long. ½ . . . 5,49<br>Haut. . . . 1,16 | 6,36 | | | |
| | | Largeur commune. . | 15,11<br>0,66 | . . . | 9,97 | |
| Trapèze *h'* . . | 1er triangle. . | Long ½ . . . 0,66<br>Haut. . . . 0,30 | 0,20 | | | |
| | 2e triangle. . | Long. ½ . . . 2,01<br>Haut. . . 0,22 | 0,44 | | | |
| | | Largeur commune. . | 0,64<br>0,66 | 0,42 | | |
| Trapèze *i*. . | 1er triangle. . | Long. ½ . . 6,84<br>Haut. . . 1,40 | 9,58 | | | |
| | 2e triangle. . | Long. ½ . . . . 6,76<br>Haut. . . . 1,41 | 9,53 | | | |
| | | Largeur commune. . | 19,11<br>0,36 | . . . . | 6,88 | |
| Pyramide *i'*. . . | . . . . . . | Long. ⅓ . . . 0,66.<br>Larg. . . . . 0,36<br>Haut. ⅓ . . . . . . | 0,24<br>0,09 | 0,03 | | |
| | | | | mc. | mc | |
| *A reporter.* . . . . . . . | | | | 306,32 | 93,82 | |

| INDICATIONS. | | DIMENSIONS. | SUPERFICIES. | CUBES EN remblai. | CUBES EN déblai. | OBSERVATIONS. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | *De l'autre part.* . . . . . . . . . | . . . . | mc. 306,32 | mc. 93,82 | |
| Trapèze *k* . . . | 1er triangle. . | Long. $\frac{1}{2}$ . . . m. 6,76 / Haut. $\frac{1}{2}$ . . . 1,42 | mq. 9,60 | | | |
| | 2e triangle. . | Long. $\frac{1}{2}$ . . . 6,50 / Haut. $\frac{1}{2}$ . . . 1,43 | 9,29 | | | |
| | | Largeur commune.. | 18,89 / 0,30 | . . . . | 5,67 | |
| Pyramide *l*. . | . . . . . . . . . | Long. $\frac{1}{2}$ . . . 6,50 / Larg. . . . . 3,15 / Haut. $\frac{1}{2}$ . . . . . . | 20,47 / 0,95 | . . . . . | 19,45 | |
| | | TOTAUX. . . . . . . . . . | | mc. 306,32 | mc. 118,94 | |

*Mode d'exécution des routes.*

L'exécution d'une route est précédée de son tracé et de l'accomplissement de toutes les formalités d'expropriation.

Le tracé définitif s'effectue de la manière qui a été indiquée pour le tracé provisoire. Des piquets, des profils cotés, sont repérés de distance en distance sur le terrain par des coupures faites dans celui-ci, ou par des canevas de planches. Ils sont disposés à chaque changement de pente et à chaque raccordement d'alignement, pour guider l'entrepreneur, ou le régisseur chargé de l'exécution des travaux. Ces agents doivent surtout recevoir des détails circonstanciés sur la répartition des déblais entre les divers points des remblais, puisque les évaluations du devis de dépense et d'adjudication ont dû être basées sur la disposition la plus économique des uns et des autres. Cette disposition doit être dans chaque zône de travail l'objet d'une étude attentive.

Quand les chemins des diverses zônes du déblai à celles du remblai sont à peu près parallèles, ce qui est le cas habituel de la pratique, on prend pour la distance moyenne de transport dans les calculs d'évaluation, la distance des centres de gravité du déblai ou du remblai. On a déjà indiqué les règles à suivre pour les autres cas.

La terre végétale, soit dans les déblais, soit dans l'emplacement des remblais, doit être mise à part pour les besoins de l'agriculture.

Déblais. Les matériaux les plus volumineux et les plus durs, fournis par les déblais sont affectés : aux fondations et revêtements des talus des remblais; au revêtissage des talus de déblais dans les terres ordinaires; enfin aux murs de soutènement qu'il y aurait à construire. Les matériaux plus petits, s'ils sont en grande abondance, sont réservés pour l'empierrement de la route et même de ses accotements. Tout le surplus des déblais rocailleux forme un lit pour les couches inférieures des remblais, ou pour des *fondations de renfort* en contre-bas de l'encaissement de l'empierrement. Ce dernier emploi est surtout utile dans les zônes de la route où le fond de la chaussée est argileux; parce que les rocailles, par leurs interstices, servent de *pierrées* ou *rigoles* d'écoulement pour l'eau longitudinalement et transversalement, et assurent l'assèchement de la route. Dans les rues des villes où les évacuations souterraines ne sont pas toujours praticables, l'on a pris quelquefois le parti d'enlever la glaise, et de la remplacer par du sable ou *des gravas*.

Figures 136 des planches.

Si les déblais sont plus considérables que les remblais, et *vice versâ*, ou que leur grande distance réciproque rende moins dispendieux l'achat et l'emploi de terrains particuliers, soit pour les dépôts des déblais, soit pour fournir des terres de remblai, on profite :

1° des excédants de déblais pour élargir la route, et préparer des lieux de dépôt en dehors de la voie de circulation pour les matériaux destinés à l'entretien;

2° des fouilles d'emprunts pour agrandir les fossés riverains.

On fera bien de consulter, au reste, un article inséré dans les *Annales des ponts et chaussées* de 1836, par M. l'Ingénieur de Bormans, sur les formes à donner *aux cavaliers*, ou dépôts de déblais excédants, afin que la dépense de leurs mouvements soit un minimum.

A défaut de pérés, de murs ou fascinages de soutènement pour les talus d'une tranchée en déblais et pour ceux d'une levée en remblais, il faut les préserver de la corrosion des eaux pluviales par des semis de plantes à racines très-épanouies, ou par des plantations d'arbres du même genre; mais ces moyens seront d'un effet lointain, et il faudra souvent y joindre des précautions *d'un effet immédiat*.

Ainsi l'on rencontre dans des tranchées profondes en déblais, tantôt des terrains schisteux susceptibles de se décomposer à l'air; tantôt des terrains argileux qui gonflent par l'humidité, prennent du retrait par la sécheresse et s'éboulent lors des gelées; ou des terrains du reste résistants.

mais qui, reposant sur des plans inclinés argileux très-abrupts, *glissent sur ces plans* et tombent dans les tranchées lors des pluies et du dégel.

L'on réussit généralement à arrêter ces derniers effets, en déviant les eaux des sources souterraines ou superficielles par des fossés qui les éloignent des veines de sable et d'argile, ou *en clouant*, pour ainsi dire sur ces couches, quand cela est possible, les terrains supérieurs à l'aide de piquetages dans le bas des talus et sur leur surface. Figures 137 des planches.

Dans des terrains marécageux ou vaseux, l'on a vu le plafond des tranchées s'élever au fur et à mesure du travail, par l'effet de la charge des reliefs riverains, et parce qu'elle n'était plus équilibrée par le poids des terres enlevées.

L'on est parvenu quelquefois à atténuer ces effets : en élargissant la tranchée, et creusant sur ses rives des fossés d'écoulement ; en battant des lignes de piquets jointifs au pied des talus pour les isoler de la tranchée ; en taillant ces talus en gradins de 2 mèt. de hauteur ; enfin en mettant des couches de fascinage à plat au fond de la tranchée et au pied des talus comme à Hédé, au point de partage du canal d'Ille et Rance. Figures 138 des planches.

Quelquefois pour éviter des déblais trop considérables et trop difficiles, l'on établit la route sur des parties de rocher en *encorbellement* ou *surplomb*; mais ce moyen n'est praticable que lorsque le rocher ne peut être détaché par des avalanches, ou par l'effet des gelées. Un percement en galerie souterraine mettant à l'abri de ces accidents sera en général préférable.

Les fig. 139 des planches indiquent quelques-unes de ces galeries, et notamment le célèbre *tunnel* en exécution à Londres sous la Tamise. On trouvera des détails sur les souterrains dans la section de l'ouvrage relative à la navigation intérieure. Figures 139 des planches.

Les remblais, surtout en pays de montagne, sont versés souvent sur des talus très-abrupts, où ils tendraient à glisser, particulièrement dans les temps de pluie ou de gelée, si l'on ne prévenait ces effets, en taillant grossièrement en gradins la déclivité du coteau, et en liant les terres du remblai à ces gradins par des *piquetages clayonnés*, tant au bas des talus que sur leur hauteur. Remblais.

Les revêtissages des talus, en fascinages, en perrés à pierres sèches ou en maçonnerie, peuvent être établis sur un seul plan incliné, ou plutôt en plans inclinés, séparés par des gradins et compartiments indépendants, comme l'a proposé M. l'Ingénieur en chef Vallée, pour les perrés des réservoirs d'eau, dans un article inséré aux *Annales des ponts et chaussées* de 1833 et déjà cité. La base de ces fascinages et perrés doit être encaissée assez profondément Murs et perrés de soutènement.

Figures 45 et 46 des planches.

dans le sol pour résister aux effets du glissement; et même si le sol est peu résistant, il faudra prendre quelques-unes des précautions indiquées lorsqu'il a été question des fondations en général.

Les pérés ont depuis $\frac{1}{2}$ jusqu'à 7 de base pour 1 de hauteur. Leur épaisseur moyenne varie entre $0^{m},30$ et $0^{m},50$ d'épaisseur pour le premier mètre de hauteur; et on l'augmente ordinairement suivant la roideur du talus et la résistance des terrains de $0^{m},05$ à $0^{m},10$ par chaque mètre subséquent en hauteur.

Figures 140 des planches.

Si le pied d'un péré de remblai, d'un mur, ou d'un faseinage de soutènement, était exposé à l'action d'un cours d'eau, on le défendrait, soit par des enrochements extérieurs, soit par des rangées de pieux avec palplanches, ou enfin par des coffres dits *crèches*, formés par deux de ces rangées et remplis en enrochements.

Extraction des déblais.

Les déblais en terrains ordinaires se font avec la pioche et le pic, et on les distingue, suivant le mode adopté par le génie militaire, en terrains *d'un*, *deux*, *trois*, *hommes à la pioche pour un à la charge*; c'est-à-dire que le terrain est considéré comme d'autant plus résistant, qu'il exige plus de *terrassiers* pour alimenter le travail continu des manœuvres *pelleurs* qui chargent les déblais en brouettes, camions, tombereaux, etc., etc. Ce mode de classification des terrains se prête parfaitement au système de tâches ou entreprises *distinctes* pour les fouilles et les transports.

On a substitué avec avantage la charrue traînée par des animaux, à la pioche du terrassier, dans des terrains de un ou deux hommes à la pioche pour un à la pelle.

Exploitations à la mine.

Lorsque les déblais ont lieu dans le rocher, et qu'on n'a aucun motif particulier pour conserver un gros volume aux produits des excavations, il ne faut pas hésiter à recourir à la mine, même dans un rocher traversé par des fils *nombreux*. Car, malgré la déperdition des gaz dans ces petits canaux intérieurs, l'on obtient en définitive, par ce moyen, des résultats plus prompts et plus économiques pour la division et déliaison des particules rocheuses, que par la main du terrassier.

L'espacement des trous de mine, leur forage (soit avec des fleurets acérés, frappés par des masses, soit par la pression ou le mouvement de rotation de lourdes barres à mine), leur profondeur, la quantité de poudre à mettre dans chaque trou de mine, doivent dans chaque localité être l'objet d'essais préalables.

L'expérience a prouvé que l'on n'affaiblissait pas *proportionnellement*

l'énergie des explosions en remplaçant jusqu'à moitié de la poudre d'une charge de mine, par de la *sciure de bois résineux*, bien séchée et bien mélangée avec la dose de poudre. Un fétu de paille ou de jonc rempli de *pulvérin*, qui dépasse la charge de la mine, sert à communiquer la combustion.

Quand les terrains à miner sont humides, l'on contient la poudre pure ou mélangée, dans des boites en *carton goudronné*, comme les boites d'artifices. Les couvercles et tubes sont en même matière, ou mieux en fer-blane, zinc, ou plomb. L'on est même obligé de recourir aux boîtes entièrement métalliques, qui coûtent deux fois plus que les précédentes, lorsque l'eau est très-abondante, et que les boites doivent y rester longtemps immergées avant d'être allumées. Figures 141 des planches

Le sommet du tube métallique doit évidemment dépasser le niveau des eaux. Ce tube est rempli ordinairement en pulvérin.

Le sable a été reconnu au reste comme la meilleure charge à superposer au-dessus des mines; son emploi dispensant du battage, prévient les accidents.

L'explosion est déterminée; soit par des petits tubes *en chandelle romaine*, dont la combustion dure 2 à 3 minutes; soit par des morceaux d'amadou auxquels on met le feu, ou par des fusées dites *moineaux* qu'un fil de fer guide jusqu'aux trous de mines. Ces derniers sont d'ailleurs reliés par des fils inflammables, ou des traînées de poudre.

D'après les relevés faits sur les déblais de la nouvelle forme sèche du port militaire de Lorient, l'exploitation de 8108$^{m.c.}$ de roc schysteux à l'aide de la poudre a employé : pour 733 mines forées, 10150 journées de terrassier mineur; 33 kil. de poudre à mousquet; 210 kil. de poudre de mine *indépendamment de celle des boîtes*; 320 boites chargées de poudre en carton goudronné et fer-blanc; 733 lances à feu; 200 kil. d'étoupe noire.

On renvoie pour plus de détails sur l'exploitation à l'aide de la poudre, aux *Manuels du génie militaire, de l'artillerie et des mines*. Quelques faits y relatifs sont consignés dans un article inséré aux *Annales des ponts et chaussées* de 1836, par M. l'Ingénieur en chef Emmery.

Les mouvements de terre dans le sens horizontal, ou jusqu'à certaines limites de pente, se font par des relais : de jets à la pelle; de brouettes, camions et tombereaux d'un ou plusieurs chevaux. Mouvements des terres dans le sens horizontal.

Les camions et tombereaux ne peuvent guère être employés sur des rampes de plus de $\frac{1}{14}$.

De nombreuses recherches sur les modes de transport les plus économiques sont consignés dans le *Cours de construction de ponts* de Gauthey

( tome 2 ); dans un article sur les terrassements de M. l'officier du génie Vaillant, emprunté au *Mémorial du génie* par les *Annales des ponts et chaussées* de 1832; enfin, dans divers articles de M. l'Ingénieur Müntz, publiés dans les mêmes *Annales*.

Il résulte de ces recherches: que sur des chemins de roulage *viables*,

Le jet à la pelle ne convient guère au delà de 15 mètres;

Le transport avec des brouettes, contenant de $0^{m.c.},03$ à $0^{m.c.},04$, doit s'arrêter à 60 mètres ou deux relais de 30 mètres, sur un terrain dont la pente est au-dessous de $\frac{1}{12}$;

Le transport avec le petit camion, décrit dans les œuvres de Peyronnet, contenant $0^{m.c.},25$, et traîné par quatre hommes, devait être renfermé entre les limites de 60 mètres et 300 mètres, et remplacé à partir de 300 mètres par le transport avec des grands camions ou des tombereaux contenant $0^{m.c.},50$;

L'emploi simultané de 2, 3, 4 tombereaux à un cheval, ou de tombereaux traînés par 2, 3, 4 chevaux, devait commencer et cesser à 1200 mèt., 2000 mèt., 4000 mètres.

Si le terrain avait une pente de plus de $\frac{1}{12}$, les relais et distances précédents devraient être réduits en proportion des pentes.

Les bases desquelles on est parti pour l'établissement des limites précédentes, seraient tout autres si les chemins de transport étaient *en bois ou en fer*, et si les véhicules eux-mêmes étaient améliorés et sujets à moins de frottements dans les essieux. On fera bien de lire dans les *Annales maritimes et coloniales* de 1835, la description communiquée par M. le conseiller d'état Baude, d'un système peu dispendieux de chemins *amovibles en fer*, avec véhicules appropriés, qu'un entrepreneur de grands terrassements avait été conduit à employer par des vues d'économie. Ce système peut trouver fréquemment son application dans les grands mouvements de terre des travaux publics.

Mouvements des terres dans le sens vertical.

Le tracé des rampes ascendantes pour les déblais d'une tranchée exige aussi une sérieuse attention, et peut, s'il est bon, produire des économies importantes. Les figures 142 des planches indiquent les dispositions suivies au canal de l'Ourcq pour les grandes tranchées des bois de Saint-Denis.

Figures 142 des planches.

Figures 143 des planches.

Dans une tranchée dont le profil longitudinal est à peu près triangulaire, comme dans la plupart des traversées de coteaux, et où il faut élever les terres sur la crête des rives de la tranchée, les rampes ascendantes

doivent être dirigées, les unes à droite, les autres à gauche du milieu, et dans des sens divergents.

Les mouvements de terre à l'aide de rampes dans le sens vertical ne peuvent quelquefois pas s'effectuer à cause du grand développement qu'il faudrait donner à ces rampes ; d'ailleurs elles ont l'inconvénient de faire monter et descendre en pure perte le poids des hommes ou animaux moteurs. Pour éviter cet inconvénient, dans divers chantiers de grands terrassements, et aux fouilles de la nouvelle *forme* du port militaire de Lorient, on faisait monter et descendre, dans des coulisses en bois, les brouettes ou tombereaux pleins et vides, par des treuils placés au haut d'un plan incliné de la pente d'environ 45°; ces treuils étaient manœuvrés par des hommes, et auraient pu l'être par des chevaux ; le poids des brouettes ou tombereaux vides descendants allégeait d'ailleurs le fardeau des brouettes ou des tombereaux pleins ascendants. Figures 144 des planches.

On peut encore arriver au même but, en plaçant les pelleurs à divers étages et à $1^m,60$ d'intervalle en hauteur.

Aux déblais du nouveau chemin de fer de Paris à Saint-Germain, les tombereaux pleins étaient élevés verticalement à l'aide de treuils placés au haut d'un échafaudage dressé sur le bord de la tranchée. Une espèce de plate-forme en pont-levis s'abaissait au-dessous du tombereau quand il était arrivé en haut, le recevait ensuite et le guidait jusqu'au point où les chevaux y étaient attelés; une manœuvre inverse servait à la descente des tombereaux vides.

Aux mêmes travaux de la forme de Lorient déjà cités, on s'est servi dès 1821 des *bourriquets* ou caisses élevés par des treuils qui sont décrits dans l'article déjà cité de M. l'officier du génie Vaillant. Ce mode d'élévation des terres est préféré au transport par brouettes au delà de 11 mètres de hauteur verticale. Figures 145 des planches.

M. l'officier du génie Coignet a imaginé pour l'élévation, dans le sens vertical, des déblais et fardeaux en général, un appareil décrit dans le *Mémorial de l'officier du génie* de 1835, et fondé sur le principe de Coulomb, qu'un homme montant à vide, et dont on emploie comme moteur le poids descendant, produit plus d'effet utile que s'il montait chargé. Figures 146 des planches.

Il est évident d'ailleurs que toutes les machines à manége, machines à vapeur fixes, amovibles, ou locomotives, sont applicables, dans les grands travaux de terrassement, soit aux transports des déblais, soit à leur ascension verticale, comme dans les exploitations de mines.

Ordre d'exécution des routes.

L'ordre d'exécution le plus économique d'une route, est celui dans lequel les portions finies servent de chemins pour les communications *locales* et pour les mouvements mêmes des déblais de la route. Toutefois les grands remblais, à raison du tassement que le temps leur fait éprouver, et par suite les grandes tranchées qui ordinairement leur fournissent les terres nécessaires, doivent être exécutés les premiers.

---

# RÉSUMÉ DE LA DIX-SEPTIÈME LEÇON.

**DES CHEMINS DE FER.**

---

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LES CHEMINS DE FER. — TRANSPORTS DANS UN SEUL SENS. — DANS DEUX SENS. — RAPPORTS ENTRE LES VITESSES DES TRANSPORTS ET LES PENTES. — CHEMINS DE MÉDIOCRE ET DE GRANDE VITESSE.

---

### *Considérations générales.*

Les chemins de fer ont pour objet, en diminuant les résistances qu'éprouvent les véhicules de transport sur les routes ordinaires, de permettre à ceux-ci, quel que soit du reste leur moteur, de charger un plus grand poids, ou de transporter le même poids avec une vitesse beaucoup plus grande.

De plus, ces chemins semblent, *jusqu'aujourd'hui du moins*, être les seuls appropriés aux machines à vapeurs motrices, et particulièrement aux machines locomotives.

Ce mode de communication est un terme nouveau dans la série des progrès de l'industrie des transports.

Les premiers transports s'étaient faits à dos d'hommes ou d'animaux, par des sentiers frayés : c'est encore le mode usité dans les pays peu civilisés, où la population est rare, et où les fardeaux peuvent être subdivisés. Par ce mode, un cheval de force moyenne, marchant au pas pendant 9 à 10 heures sur 24, ne peut guère transporter que 100 kilog.

On remarqua ensuite qu'une force motrice produisait plus de résultats quand *on traînait* les fardeaux sur des chemins tracés régulièrement. Mais le frottement dans ce nouveau mode était une résistance énorme, presque le tiers du poids. On y remédia successivement; par des corps ronds en bois, ou métalliques, interposés entre les véhicules et la surface du chemin; puis par des roues, dont le diamètre a grandi progressivement et que le frottement encore subsistant faisait lui-même tourner. Enfin, à de gros essieux volumineux en bois, tournant dans des moyeux également en bois, l'on a substitué des essieux en fer, d'un petit diamètre, tournant sur des coussinets en cuivre.

Les routes, d'abord simplement ouvertes et grossièrement aplanies, ont été à leur tour progressivement améliorées jusqu'à l'état actuel des routes empierrées et pavées. L'effort à exercer, lorsque la vitesse du transport est celle du cheval au pas, a été ramené ainsi pour les routes empierrées, à n'être que du $\frac{1}{18}$ au $\frac{1}{25}$ du poids à transporter (y compris celui du véhicule), et du $\frac{1}{30}$ au $\frac{1}{37}$ pour les routes pavées.

Mais le poids des véhicules qui est venu s'ajouter à celui des fardeaux, et qui généralement en est encore le tiers, a atténué ces résultats. *Les fardeaux seuls* ne sont plus que les équivalents de $\frac{1}{13}$ à $\frac{1}{18}$ sur les routes empierrées, et de $\frac{1}{22}$ à $\frac{1}{27}$ sur les routes pavées.

Pour arriver à une réduction plus grande encore des frottements et des efforts, l'on a substitué aux routes empierrées, des chemins en planches et même des lignes longitudinales de pierres dures bien taillées et dressées, dont la voie était parcourue par les roues. On a déjà dit que le frottement n'était dans ce dernier système évalué qu'au $\frac{1}{90}$ du poids, y compris celui du véhicule. De là on a passé aux bandes de fer plat avec rebord ou *tram-rails*, qui se prêtaient à la conservation des anciens véhicules de transport, et auxquels, malgré cette considération, on a trouvé avantageux de substituer les *edge rails* actuels saillants, parcourus par des *waggons avec roues à gorge.*

Le frottement *moyen* sur des chemins de fer en *état ordinaire d'entretien* et *pour toutes les saisons* est estimé aujourd'hui être de $\frac{1}{200}$ à $\frac{1}{250}$ du poids.

La force dépensée inutilement dans les montées et descentes des routes ordinaires, avait aussi fait réduire successivement le maximum des pentes, de $\frac{1}{10}$ à $\frac{1}{12}$, et de $\frac{1}{12}$ à la limite actuelle de $\frac{1}{20}$. Mais cette limite devait s'abaisser elle-même avec la diminution du frottement des véhicules; puisque ce dernier était un frein dans les descentes, et que dans les montées

il formait une partie notable de l'effort à exercer. En atténuant ce frottement presque des $\frac{9}{10}$ par des voies en fer, on rendait *prépondérante* la composante des poids parallèle aux montées, et dès lors on a dû chercher à la diminuer dans le même rapport. Aussi la limite supérieure de pente, généralement admise aujourd'hui dans les chemins de fer, n'est que de $0^m,005$ à $0^m,006$ par mètre, à moins de sujétions spéciales.

Mais si les améliorations progressives amenées par la civilisation, par des échanges nombreux et par une grande fréquentation des routes de terre, *appréciées* par les *termes extrêmes de la série*, ont augmenté l'effet d'un moteur animé pour les transports sur les chemins *de terre*, dans la proportion de 1 à 100 et même 150, elles n'ont pas diminué la *dépense de transport* par *unité de distance* dans un rapport aussi grand.

La cause en est : dans la part de plus en plus notable que, le poids et le prix des véhicules, et les salaires ont prise dans les frais de transport. Les moteurs à vapeur et waggons employés sur les chemins de fer, ne pouvant jusqu'à ce jour être employés indistinctement sur ces chemins et sur les routes ordinaires, forment un élément important du prix de revient des transports. De plus, l'adoucissement des pentes des routes entre les points de départ et d'arrivée n'a pu souvent s'obtenir qu'en allongeant le trajet. Enfin, que ce soit l'état ou le commerce des transports qui subvienne aux frais de construction et d'entretien des routes de diverses espèces; l'intérêt du capital initial, et les dépenses annuelles d'entretien forment une rente qui doit être jointe à toutes les dépenses annuelles de transport, et qui grevera d'autant plus les objets transportés, qu'ils seront en moindre quantité et de moindre poids.

Une route ordinaire empierrée peut coûter par kilomètre 17,000 fr. de construction, et 500 fr. d'entretien annuel; un canal ressort moyennement à 150,000 fr. par kilomètre pour construction; à 1400 fr. pour entretien, non compris frais d'administration; et à 2,500 fr. avec ces frais; un chemin de fer peut coûter par kilomètre pour sa seule construction jusqu'à trois millions (non compris les waggons et remorqueurs), et pour l'entretien annuel jusqu'à 14,000 fr.

Sur un chemin de fer desservi par des chevaux ou des machines *locomotives*, le prix total du transport d'un tonneau (1000 kil.) pour toute une ligne, se compose en général des dépenses suivantes, divisées par le nombre total annuel de tonneaux transportés :

| | |
|---|---|
| 1° Péage du chemin (1). | Intérêt des capitaux engagés dans la construction. Entretien annuel, y compris les frais d'administration. |
| 2° Transport. | Dépense d'*abonnement* pour les chevaux, ou dépense de loyer, d'entretien et de chauffage de la machine motrice. Elle dépend à la fois de la longueur du chemin et de la quantité de marchandises transportées. Dépense de loyer et d'entretien des waggons et voitures. *Id.* Dépenses d'emmagasinage et d'expédition. *Id.* |

On entrevoit déjà que les chemins de fer ne peuvent convenir qu'entre deux grands foyers d'échanges commerciaux ; et que, même là, ils auront à soutenir une concurrence redoutable, avec les routes ordinaires et les communications par eau, toutes les fois que *la vitesse ne sera pas un élément essentiel des transports.*

Les routes ordinaires n'imposent en effet en France aucun impôt à ceux qui les parcourent, *admettent toute espèce de véhicules, et n'exigeant pas un matériel spécial, ne monopolisent pas les transports entre les mains d'un petit nombre.* Cette dernière circonstance peut avoir les conséquences les plus graves surtout dans les chemins de *grande vitesse*, sur lesquels des mouvements de troupes, de convois militaires, d'approvisionnements de guerre, devraient être opérés dans *un temps déterminé.*

Les rivières, les canaux, où le péage est très-faible, et où le rapport de l'effort au poids mis en mouvement est à raison de $\frac{1}{1152}$ dans une eau stagnante, à la vitesse de 1 mèt. par seconde, seront, malgré l'allongement du trajet, et les retards pour les passages d'écluses, préférables dans beaucoup de cas à un chemin de fer qui desservirait les mêmes villes.

---

(1) Le prix de construction pour les chemins de fer établis jusqu'à ce jour en France et en Angleterre, *indépendamment du matériel d'exploitation*, a varié, pour les chemins de fer à une seule voie, de 22,000 fr. à 220,000 fr. le kilomètre ; et pour les chemins à deux voies de 257,000 le kilomètre à 525,000 fr. Le chemin de fer de Paris à Saint-Germain est ressorti à 430,000 fr. le kilomètre, pour les zônes les plus voisines de cette dernière ville. Les chemins projetés à deux voies de Paris, à Orléans, à Tours, à Rouen, à la frontière, et de Lyon à Marseille, ont été estimés le kilomètre 177,000 fr., 256,000 fr., 246,000 fr., 232,000 fr., 153,000 fr., on a toutefois accusé ces évaluations d'insuffisance. La dépense pour la voie de fer est généralement de la moitié au tiers de la dépense totale, *dans les chemins à deux voies.* Les frais annuels d'entretien des chemins ont varié jusqu'à ce jour, pour une seule voie et par kilomètre, de 840 fr. à 3,300 fr.; et ils ont été, dans le chemin à deux voies et *à grande vitesse* de Liverpool à Manchester, et dès les premières années, de près de 9,000 fr. par kilomètre.

Ces chemins semblent donc réservés particulièrement pour les transports avec une vitesse supérieure à celle du roulage ou à celle des voitures de poste sur les routes; c'est-à-dire, pour les voyageurs et quelques marchandises, qui, sous un faible poids ou volume, ont une assez grande valeur. C'est ce que l'expérience a fait connaître sur les chemins de fer de Saint-Etienne à Lyon, de Liverpool à Manchester, de Bruxelles à Anvers, etc., etc., où le nombre des voyageurs a augmenté de 1 à 6 et même de 1 à 10 par l'établissement des chemins de fer.

Toutefois, on a émis l'opinion récemment, qu'à raison des *incomplets* éventuels en voyageurs il serait avantageux, et malgré les dépenses supplémentaires en matériel de transport, de faire concourir simultanément les marchandises et les voyageurs. On a classé à cette occasion les marchandises en trois catégories.

La première; celles qui veulent voyager très-rapidement et à jours *déterminés*.

La deuxième; celles qui peuvent attendre, de manière à voyager par un *envoi complet*.

La troisième; celles qui pourront être expédiées à loisir en complément de charge soit de voyageurs, soit de marchandises.

M. l'Ingénieur en chef Vallée, dans le mémoire à l'appui du projet de chemin de fer de Paris à la frontière belge, fait remarquer du reste que dans la plupart des évaluations de la *fréquentation probable* de ces nouvelles voies, on ne tient pas assez compte des transports entre les *stations intermédiaires*.

On a expérimenté en effet au nouveau chemin de fer de Paris à Saint-Germain, que la création de deux stations intermédiaires, à Nanterre et à Chatou, desservies seulement le matin et le soir, avait été très-profitable à la compagnie concessionnaire. Mais chacune de ces stations fait perdre cinq minutes, et la durée totale du trajet pour 18 kilomètres 40, a été portée de 28 à 30 minutes, jusqu'à 38 et 40 minutes.

M. Vallée a émis l'opinion que, à *égalité de transports*, les chemins qui mettent en relation les lieux les plus éloignés, sont plus profitables que ceux dont le trajet est très-court; parce qu'il y a une foule de frais fort considérables et de pertes de temps qui sont indépendants de la longueur du chemin.

Toutefois on a fait aussi observer avec raison que la portion de la population d'un état qui est susceptible de se déplacer à *grandes distances* de 60 à

80 lieues, est très-restreinte; et que dès lors les chemins de fer n'auront pour résultat que de multiplier dans un temps donné les voyages de *cette catégorie*. Si donc un chemin de grande longueur ne desservait pas en même temps les communications intermédiaires, s'il ne devenait pas en quelque sorte la réunion *bout à bout* de plusieurs chemins successifs, il se placerait dans des conditions financières peu favorables. Mais par contre, la durée totale du trajet entre des *points extrêmes* distants de vingt lieues et au delà sera toujours augmentée par les pertes de temps des stations intermédiaires.

Chemins de grande longueur

Le *morcellement* des chemins de grande longueur sera encore déterminé par les difficultés de l'exploitation des transports, et celles de l'énorme matériel qu'elle exigera. Car les réparations d'une machine locomotive ou d'un waggon, exigent au préalable leur *remplacement immédiat* dans la circulation.

On trouvera du reste l'exposé des principales considérations politiques, commerciales et administratives relatives aux chemins de fer, dans les articles insérés, par feu M. Navier, et par d'autres Ingénieurs dans les *Annales des ponts et chaussées*; dans les mémoires publiés par MM. les Ingénieurs Desfontaine, Vallée et K'maingant, à l'appui des projets de chemins de fer de Paris, à Orléans, à la mer, à la frontière belge, et de Lyon à Marseille; dans les rapports et discussions des deux chambres législatives de France pendant les sessions de 1837 et 1838; enfin dans les documents publiés par M. le major Poussin, et par M. Michel Chevalier, sur les chemins de fer des Etats-Unis.

Analogies et dissemblances des chemins de fer et des routes ordinaires.

Les chemins de fer se distinguent des routes ordinaires pavées ou empierrées par leur moindre largeur; par des rayons de courbure plus grands et dont le minimum parait fixé à 500 mètres pour les raccordements d'alignements différents; par leur moindre pente; par la forme de leurs chaussées, enfin par les sujétions de leurs raccordements avec d'autres chemins en fer ou routes ordinaires. Ainsi les chemins de fer *dits de grande vitesse* ont été obligés, par des motifs de sûreté publique, de passer les uns au-dessus, les autres au-dessous des autres chemins, afin que les véhicules qui leur sont propres pussent se croiser au même moment.

Mais les chemins de fer ont, en commun avec les routes ordinaires, tous les travaux de terrassements, les remblais élevés, les grandes tranchées ou les souterrains qui en tiennent lieu, les ouvrages d'art de toute espèce, tels que murs de soutènement, ponts, aqueducs, etc. Ces ou-

vrages y sont seulement beaucoup plus multipliés que dans les routes ordinaires, parce que, dans ces dernières, les limites de pente étant beaucoup plus élevées, les raccordements étant plus brusques, donnent un plus grand nombre de solutions.

Ce qu'on a dit pour le tracé et le mode d'exécution des routes ordinaires s'applique donc aux chemins de fer; même on peut y appliquer aussi plusieurs des considérations qui déterminent le tracé d'*un canal de navigation*; et c'est ainsi que M. l'Inspecteur divisionnaire K'maingant, auteur du projet de chemin de fer de Lyon à Marseille, a tiré un grand parti des études antérieurement faites par M. l'Inspecteur général Cavenne, pour un canal latéral au Rhône.

Figures 147 des planches. Les figures 147 des planches représentent les profils en long des chemins de Liverpool à Manchester, et de quelques chemins des Etats-Unis d'Amérique.

On a dit déjà, à propos des routes ordinaires, les conditions générales d'après lesquelles il y aura à opter entre une déviation d'une grande ligne de transport, et un embranchement spécial, pour les communications à établir avec des points situés dans la zône d'activité du chemin.

Il est évident du reste, que la précision nécessaire dans les rails, les chances d'accidents plus graves, les pertes plus importantes qui résulteraient de l'interruption momentanée d'un chemin de fer, exigent beaucoup plus de soins dans l'exécution des ouvrages que dans une route ordinaire. Ainsi dans les grands remblais il faudra se prémunir davantage contre les tassements; dans les déblais, il y aura à prévoir les éboulis de terres, etc., etc. Dans les souterrains, les chaussées intercalaires aux rails devront être maintenues au-dessus du niveau maximum de *la nappe d'eau* des sources locales.

C'est à la précipitation et à la parcimonie avec lesquelles quelques chemins de fer ont été exécutés, qu'on doit attribuer les réparations dispendieuses, le succès incomplet de quelques-unes de ces nouvelles voies de communication.

*Classement des chemins de fer.*

Les chemins de fer se subdivisent en plusieurs catégories. Ainsi, ils peuvent servir à transporter des fardeaux seulement dans un seul sens ou bien dans les deux; ils peuvent être à une ou à deux voies; à médiocre ou à

grande vitesse, c'est-à-dire desservis à volonté par chevaux et machines locomotives, ou par ces dernières exclusivement. Ils servent alors spécialement aux voyageurs et aux marchandises de grand prix, sous un faible volume ou poids. Enfin ces voies elles-mêmes peuvent être en *tram-rails*, ou *edge-rails*; et ces rails peuvent être en fonte ou en fer forgé.

### *Transports dans un seul sens.*

Quand les transports n'ont lieu que dans un seul sens, et *qu'il est en descendant*, l'on peut régler la pente en approfondissant au besoin le point de départ, ou en exhaussant le point d'arrivée, de manière que les mêmes chevaux ou moteurs, qui traîneraient les véhicules pleins en descendant, suffisent pour les monter à vide, c'est-à-dire lorsqu'ils pèsent trois à quatre fois moins. Cette pente serait de $\frac{1}{330}$, en supposant le frottement égal au $\frac{1}{180}$ de la pression; mais cette faible pente serait rarement possible sans des dépenses considérables. Transports dans un seul sens descendant.

On peut lui substituer celle qui ferait descendre d'eux-mêmes et avec une vitesse modérée, les charges avec les *chevaux destinés à la remonte*, en sorte que ceux-ci n'auraient qu'à ramener les véhicules à vide. Pour prévenir l'accélération de vitesse, il faudrait donner d'autant moins de pente que le chemin serait plus long. M. l'Ingénieur en chef Minard, dans son *Essai sur les chemins de fer*, auquel on renvoie pour tous les détails, indique pour règle la pente de $\frac{1}{160}$, bien qu'il cite un chemin de fer anglais qui, sur une descente de 200 mètres de longueur, présente $\frac{1}{110}$ de pente.

Enfin par le système des plans inclinés dits *self-acting* (automoteurs ou travaillant sur eux-mêmes), on pourrait au besoin intercaler des pentes depuis $\frac{1}{6}$ jusqu'à $\frac{1}{40}$ entre des pentes plus douces, en employant la descente des waggons pleins à faire remonter les waggons vides; ces derniers feraient alors l'office de freins. L'on a exécuté en Angleterre quelques uns de ces plans inclinés depuis 200 mètres jusqu'à 1,200 mètres de longueur; on les a même composés de plusieurs pentes ayant en profil longitudinal des formes concaves ou convexes; *leur ligne directrice elle-même* a été brisée en plusieurs alignements, ou courbée sur des arcs de 100 mèt. de rayon. Figures 148 des planches. Plans inclinés automoteurs.

Si, toujours dans l'hypothèse de la marche des fardeaux dans un seul sens, ce sens est ascendant; une pente unique peut être remplacée par un système de rampes diverses entremêlées de paliers horizontaux; car on a déjà dit pour les routes ordinaires, que les chevaux fatiguent moins quand Transports dans un seul sens ascendant.

ils passent par des alternatives de travail plus ou moins intenses et des par directions variées de traction. Toutefois ces alternatives ne doivent pas être trop fréquentes pour éviter les pertes de force vive qui ont lieu dans les changements de vitesse, à raison de l'inertie des masses à mouvoir. Le tracé peut même présenter alors des pentes descendantes jusqu'à une certaine limite, *lorsque l'on emploie pour moteur des machines locomotives*. Feu M. Navier a prouvé, en effet, qu'avec ce genre de moteur, les alternatives de pentes et rampes n'avaient pas d'influence sur la dépense totale des transports (voir les *Annales des ponts et chaussées* de 1835 et 1836).

Si le chemin est de *médiocre vitesse*, et que les chevaux soient la force motrice, le maximum d'inclinaison des rampes a été généralement porté à $\frac{1}{100}$, et devrait se rapprocher habituellement de $\frac{1}{200}$, à moins qu'on n'ait recours à des chevaux de renfort, ou à des plans inclinés à pente roide et avec *moteurs fixes*.

**Emploi des chevaux sur les chemins de fer.**

L'effet utile du cheval décroit rapidement avec la vitesse. M. l'Ingénieur Fourrier, dans un article inséré aux *Annales des ponts et chaussées* de 1836, a représenté les résultats d'observations par la formule suivante, où E désigne l'effet utile, en tonneaux T transportés à 1 kil. dans un jour; et V les vitesses en kilomètres par heure, $E = 0,90\,T\,(1 + \sin.[V - 1,60])$, où les longueurs de l'arc $(V - 1,60)$ seraient mesurées sur une circonférence dont le rayon serait $\frac{3^{m},20}{\pi}$, les sinus étant toujours dans le cercle qui aurait l'unité pour rayon. Le maximum d'effet utile correspond à la vitesse de $0^{m},90$ à 1 mètre par seconde, ou $3^{kilom.},24$ à $3^{kil.},60$ à l'heure. A la vitesse de $3^{m},50$ à $4^{m},50$ par seconde, ou $12^{kilom.},60$ à $16^{kil.},20$ par heure; l'effet utile est déjà réduit du tiers au cinquième. De plus, quoique les moteurs animés reprennent en quelque sorte des forces dans les changements de vitesse et dans les descentes pour les montées; cependant il y a loin de cet effet à la propriété déjà signalée dans les machines locomotives.

Ainsi, même dans les chemins de fer dits de *médiocre vitesse*, c'est-à-dire de $3^{m},50$ à $4^{m},50$ par seconde ($12^{kilom.},60$ à $16^{kil.},20$ par heure) il y aura lieu dans chaque localité à comparer, sous le rapport des transports, l'emploi du cheval à celui des machines à feu, locomotives ou stationnaires, en faisant entrer dans les calculs, les intérêts des capitaux primitifs, les frais annuels d'entretien, de renouvellement, etc., etc.

L'emploi des machines à vapeur est, au reste, le seul praticable jusqu'à ce jour pour des vitesses au delà de $4^{m},50$ par seconde.

Avantages et inconvénients des machines stationnaires et des machines locomotives.

L'on a débattu longuement la préférence à donner aux machines locomotives sur les machines fixes.

Ces dernières présentent l'avantage de s'adapter à des pentes très-variables, et d'épargner la portion de la force motrice qui, dans les machines locomotives, est employée à les mouvoir *elles-mêmes*, ainsi que leur approvisionnement d'eau et de charbon. Cette force, suivant la pente, peut être depuis le $\frac{1}{5}$ jusqu'à la moitié du poids brut; de plus un système de machines fixes permet d'utiliser la descente des waggons vides pour aider le remontage des waggons pleins.

Mais le système des machines fixes a aussi les inconvénients : 1° d'exiger de prime-abord le maximum de dépense initiale, tandis que les moteurs mobiles ne se multiplient qu'à raison des besoins ; 2° d'occasionner la même dépense de chauffage et d'entretien pour le passage d'un seul convoi que pour celui de plusieurs ; 3° de dépenser pour la manœuvre, dans certains cas, presque les $\frac{1}{3}$ du temps total du trajet ; 4° d'arrêter toute la circulation en cas d'avarie d'une seule des machines fixes ; 5° de multiplier les chances d'avaries par l'emploi d'un personnel nombreux, et de beaucoup de poulies et de cordages ; 6° de faire perdre à chaque station la force nécessaire pour vaincre l'inertie des masses à faire passer du repos au mouvement ; 7° de dépenser également une partie de la force motrice en frottement des cordages : ce frottement varie entre le $\frac{1}{10}$ et le $\frac{1}{3}$ de la pression; 8° d'assujettir, par suite de l'emploi des cordes, les chemins de fer, même à *faible vitesse*, à passer au-dessus ou au-dessous des chemins ordinaires avec lesquels ils se croisent, à moins qu'on n'y fasse courir les cordes *dans des conduits en fonte*; 9° enfin ce système suppose qu'il y aura presque équivalence entre les transports *en sens opposés*. Par tous ces motifs on a, même en Angleterre, limité l'emploi des machines stationnaires aux chemins de fer en pays de montagnes, où l'adoucissement des pentes entrainerait dans des dépenses exorbitantes, et où l'on est forcé de recourir aux plans inclinés à pente roide.

Emploi des machines locomotives pour les transports.

Les machines locomotives, telles qu'on les construit aujourd'hui, jouissent entre certaines limites de pente, d'une propriété précieuse, celle de pouvoir varier leurs efforts et leurs vitesses, sans perte notable dans l'effet utile; d'*emmagasiner* en quelque sorte la force comme un volant ordinaire, et de faire profiter ainsi pour les montées, de la vitesse acquise pendant les descentes, en sorte qu'un système de pentes et contre-pentes, ménagé de manière que la machine n'ait besoin du frein dans aucune descente, ne dépensera

pas sensiblement plus de force qu'une seule pente depuis le point de départ jusqu'au point d'arrivée. (Voir les articles déjà cités de feu M. Navier, publiés dans les *Annales des ponts et chaussées* de 1835 et 1836.) Sous ce rapport, des chemins de fer avec une machine locomotive sont un appareil mécanique supérieur aux canaux de navigation artificiels.

Rapports entre les pentes et vitesses de transports par machines locomotives.

On avait déduit d'expériences faites au chemin de fer de Liverpool à Manchester les rapports suivants entre les pentes d'un chemin rectiligne, et les vitesses d'une même machine traînant le même fardeau sur des pentes différentes.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Pente. | 0 | Vitesse. | 20 mèt. | par seconde. |
| — | $\frac{1}{1000}$ | — | 13 | — |
| — | $\frac{1}{445}$ | — | 11 | — |
| — | $\frac{1}{300}$ | — | 9 | — |
| — | $\frac{1}{12}$ | — | 1,6 | — |

Mais feu M. Navier, dans l'article déjà cité publié aux *Annales des ponts et chaussées* de 1836, et M. l'Ingénieur K'maingant dans le mémoire à l'appui du chemin de fer de Lyon à Paris, partant des observations contenues dans l'important traité de M. Guyonneau de Pambour sur les machines locomotives, et supposant : le premier que le coefficient du frottement sur un chemin de fer est $\frac{1}{210}$, et le second que ce coefficient était $\frac{1}{250}$, ont posé les équations suivantes entre la vitesse de translation d'une machine et la pente du chemin, et entre la force de la machine et le poids transporté.

Formule de M. Navier, $$V = \frac{\Pi v F}{F'' \frac{Cd^2}{D} + (4{,}073 + 1131{,}4\, i)p + \alpha + \beta V^2}$$

Formule de M. K'maingant, $$V = \frac{\Pi v F}{F'' \frac{cd^2}{D} + (1{,}125 p\, 0{,}004 \pm i) + \alpha + \beta V^2}$$

où V est la vitesse de translation en mètres par seconde ; $v$ le volume en mètres cubes de la vapeur d'un kilog. d'eau à la pression atmosphérique de F kilog. par mètre carré ; $\Pi$ le poids de vapeur utilisé en une seconde ; $i$ la pente du chemin par mètre ; $p$ le poids total du train en tonneaux de 1,000 kil., comprenant la machine et son allége (*tender*) pour le transport de l'eau et du charbon ; $F''$ la pression de la vapeur restée derrière les pistons ; C la course des pistons ; $d$ le diamètre des pistons ; D celui des roues ; $(\alpha + \beta V^2)$ la partie de la résistance correspondante, à l'effort néces-

saire pour faire marcher la machine à vide, et au choc de l'air, qu'on a trouvé par expérience être $10 + 0{,}4445\ V^2$.

On déduit des équations précédentes :

Formule de M. Navier, $$P = \frac{\frac{\Pi \nu F}{V} - \frac{F'' c d^2}{D} - (\alpha + \beta V^2)}{4{,}073 \pm 1131{,}4 i};$$

Formule de M. K'maingant, $$P = \frac{\frac{\Pi \nu F}{V} - \frac{F'' c d^2}{D} - (\alpha + \beta V^2)}{1{,}125 (0{,}004 \pm i)};$$

Formule de M. Navier, $$i = \frac{(F - F'') \frac{c d^2}{D} - \left[\alpha + \beta \left(\frac{\nu \Pi D}{c d^2}\right)^2\right]}{1131{,}4 p} - 0{,}0036,$$

Formule de M. K'maingant. $$\pm i = \frac{\frac{\Pi \nu F}{V} - \frac{F'' c d^2}{D} - (\alpha + \beta V^2)}{1{,}125 p} - 0{,}004.$$

Au moyen de ces formules on peut déterminer pour une machine donnée l'une des trois quantités $i$, V et $p$, quand les deux autres sont données.

M. Navier faisant l'application numérique de ses formules à une machine de 3,5 atmosphères de pression moyenne ; 0m,279 de diam. de cylindre ; 0m,406 de course de piston ; pesant 11 tonneaux, y compris l'allége ; traînant en charge utile 52 tonneaux, et en tout p=91 tonneaux (y compris le poids des waggons) est arrivé au tableau suivant :

| Indication des pentes *i*. | | Pression variable sous laquelle la vapeur est supposée produite. | Vitesse permanente par seconde V. |
|---|---|---|---|
| | | atm. | m. |
| Descendantes | 0,006 | 3 | 22,78 |
| — | 0,005 | 3, 5 | 19,71 |
| — | 0,004 | 4 | 16,85 |
| — | 0,003 | 4, 5 | 14,31 |
| — | 0,002 | *Id.* | 12,13 |
| — | 0,001 | *Id.* | 10,38 |
| | 0,000 | *Id.* | 9 |
| Ascendantes | 0,001 | *Id.* | 7,91 |
| — | 0,002 | *Id.* | 7,03 |
| — | 0,003 | 5 | 6,37 |
| — | 0,004 | 5, 5 | 5,93 |
| — | 0,005 | 6 | 5,39 |
| — | 0,006 | 7 | 5,02 |

En supposant : qu'il ne s'agit que de l'effet utile, c'est-à-dire du poids utile (défalcation faite du poids de la machine, des alléges et des véhicules de transport), multiplié par la vitesse moyenne du transport ; que la grandeur de cette vitesse n'importât point au transport ; et que la longueur totale du chemin fût sensiblement la même, les formules précédentes ont conduit M. Navier aux conclusions suivantes :

Avec la machine motrice prise pour exemple de calcul, il y aurait une économie de 28 p. 100 sur la dépense de cette machine, si l'on réduisait la vitesse moyenne de transport sur les pentes de niveau de 9 mètres par seconde à $6^m,40$ (même dans un chemin où il y aurait des pentes de 5 millim. par mètre); et en changeant l'espèce de machine, on aurait une économie de 24 p. 100 à réduire cette vitesse de 9 mèt. à $4^m,54$.

Mais si de plus l'accroissement de vitesse moyenne de transport ne pouvait être obtenu que par un adoucissement des pentes, et que ce dernier exigeât une plus grande longueur de chemin, et partant plus de dépense initiale de construction et d'entretien ; on arriverait à reconnaître dans quelques circonstances que, sous le rapport de *l'effet utile*, les rampes très-douces n'offrent *pas autant d'avantages qu'on le supposerait*, surtout si l'on remarque qu'une grande vitesse de transport hâte l'usure des chemins et des véhicules.

M. l'Ingénieur K'maingant, dans la note 18 de son *Mémoire sur le chemin de fer de Lyon à Marseille*, supposant deux systèmes de pentes où les plus fortes rampes soient $i$ et $i'$, et prenant pour base que le tonnage des transports et les prix des tarifs de péage et de transport doivent être les mêmes et appelant :

| | Pour la pente $i$. | Pour la pente $i'$. |
|---|---|---|
| La dépense de construction du chemin. . . . . . . . . | D | D'..., |
| La dépense du matériel des transports. . . . . . . . . . | M | M'..., |
| Les frais annuels de traction. . . . . . . . . . . . . . . | T | T'..., |
| Les frais annuels d'entretien et de renouvellement du chemin et du matériel. . . . . . . . . . . . . . . | E | E'..., |
| L'intérêt des capitaux employés à D et M, D' et M' . . . | | $r$, |

arrive aux équations

$$\begin{cases} (D+M)r+T+E=(D'+M')r+T'+E \\ (D'-D)=M-M'+\dfrac{(T-T')+(E-E')}{r} \end{cases}$$

pour qu'il y ait équilibre entre les deux tracés.

Au reste, il y a des limites pour une machine donnée, et à l'augmentation des charges, et à la diminution des vitesses par l'*accroissement unique des pentes*.

**Limites dans l'emploi des machines locomotives, à l'augmentation des charges et à la diminution des vitesses.**

1° Dans le mouvement uniforme, le volume de l'espace parcouru par les pistons dans un temps donné doit être égal au volume de vapeur utilisé dans le même temps pour produire l'action de la machine. De plus la pression et la température qui ont lieu dans les cylindres, dans les cas *les plus favorables*, ne peuvent être que celles de la chaudière. On a donc l'équation $cd'V = vD\Pi$, qui détermine le minimum de vitesse.

2° Il faut que l'adhérence des roues de la machine locomotive sur les chemins en rampe les empêche de glisser; car à l'inverse des moteurs ordinaires, c'est le mouvement de rotation qui, dans les machines locomotives, produit le mouvement de translation du système. La retenue des roues provient de l'entrelacement, par le poids de l'appareil, des petites aspérités des roues et de celles des rails. Quand les roues glissent, ces aspérités sont surmontées ou brisées, et les roues et rails s'usent plus vite : ce glissement est d'autant plus facile, qu'il y a de l'eau, de la boue ou de la neige. D'après des expériences de M. Wood, auteur d'un traité fort estimé sur les chemins de fer, le frottement de retenue ou d'adhérence d'une machine locomotive sur les rails est le $\frac{1}{10}$ de son poids. Mais M. Guyonneau de Pambour a trouvé que, pour de petites vitesses et par un beau temps, ce rapport s'élevait jusqu'à $\frac{1}{6}$. MM. Navier et K'maingant ont adopté, l'un $\frac{1}{14}$, l'autre $\frac{1}{15}$. En appelant donc $\frac{1}{m}$ la plus grande pente cherchée, $\frac{1}{r}$ le rapport du frottement à la pression pour les locomotives et trains des waggons sur un chemin de niveau, on aura $\frac{L}{15} = \frac{L+W}{r} + \frac{L+W}{m}$ pour déterminer $\frac{1}{m}$ ; L étant le poids de la machine locomotive, et W celui de l'allége et des waggons chargés.

3° Il faut que les waggons vides, à leur retour, ne prennent pas une accélération de vitesse trop grande, qui dépenserait en pure perte une partie de la force des machines. Mais cette troisième limite se trouve observée si les deux premières sont satisfaites.

**Alignements curvilignes.**

Les vitesses calculées par les formules précédentes, ne s'appliquent qu'aux alignements rectilignes; mais dans les alignements courbes, il y a des frottements dus à la force centrifuge, et au parallélisme des axes des roues, qui réduisent cette vitesse. M. Navier les a appréciés dans une

note insérée aux *Annales des ponts et chaussées* de 1834. M. K'maingant, dans le mémoire déjà cité, a admis que la résistance était en raison inverse des rayons de courbure, et que, pour un arc de 500 mèt. de rayon, elle était la moitié de la résistance due au tirage sur un chemin rectiligne de niveau; c'est-à-dire que dans les formules qui donnent V, il faut pour le trajet des courbes augmenter P de moitié en sus lorsque les courbes ont 500 mètres de rayon.

Figures 149 des planches.

A un chemin de fer descendant d'exploitation de pierres pour la digue de Cherbourg, la courbure est de 320 mèt. de rayon; et les expériences de M. l'Ingénieur Virla, insérées aux *Annales des ponts et chaussées* de 1835, ont fait connaître que le frottement total, sur ce chemin, était compris entre $\frac{1}{153}$ et $\frac{1}{175}$ de la pression.

La courbure minimum des chemins de fer a quelquefois été réduite à 300 mèt. et même 150 mèt. de rayon aux approches des points extrêmes et des gares de stationnement, à raison du rallentissement obligé de vitesse à l'arrivée ou au départ.

La perte de force due aux courbes, et les grands excédants de dépenses qu'il faut subir pour les éviter dans le tracé des chemins, ont fait rechercher les moyens d'atténuer les causes des frottements des waggons et machines dans les rails curvilignes. M. Laignel, Ingénieur civil, s'en est particulièrement occupé.

Figures 150 des planches.

On a proposé entre autres: une surélévation du rail extérieur de la courbe, proportionnelle au rayon de courbure; une inclinaison conique dans la bande des roues qui se prête au déplacement des points de contact de ces bandes avec le dessus des rails. On a songé aussi à varier les directions relatives des axes des diverses paires des roues, et à *rendre celles-ci mobiles autour de ces axes.*

Calcul de la vitesse moyenne et du tems total du trajet

Connaissant les longueurs des diverses rampes, parties de niveau et pentes d'un tracé, on peut, en y appliquant les vitesses correspondantes, calculées comme il a été dit ci-dessus, trouver approximativement le temps total du trajet et la *vitesse moyenne*, et en déduire les dépenses en force motrice. M. l'Inspecteur divisionnaire Fèvre, dans une note insérée aux *Annales des ponts et chaussées* de 1836, a donné des formules pour trouver immédiatement la durée du trajet et la vitesse moyenne, en tenant compte de toutes les circonstances du tracé, et il en a fait l'application au chemin de fer de Liverpool à Manchester.

M. Navier, dans le mémoire déjà cité plusieurs fois, faisant abstraction

de la résistance de l'air, pose pour le calcul de la vitesse moyenne

$$V = \frac{m}{\pm P \times \frac{H}{L} + n}$$

$m$ et $n$ étant des constantes pour la même machine ; P l'effort moyen ; H la différence de niveau des points de départ et d'arrivée ; L la longueur du chemin.

Quand les rampes d'un projet sont toutes égales entre elles, ou varient entre de faibles limites, la machine locomotive est déterminée par la condition de pouvoir satisfaire à la plus forte de ces rampes. Mais quand ces rampes sont très-diverses, cette condition peut être onéreuse ; parce qu'elle exigerait des machines, ou plus fortes, plus compliquées et plus dispendieuses, ou consommant plus de charbon qu'il ne serait nécessaire pour les *rampes habituelles* du projet.

On peut y obvier, soit en utilisant le retour des waggons vides, soit par des chevaux ou machines locomotives *de renfort* placés au bas des rampes les plus roides, ou par des chevaux et machines stationnaires fixées au haut, et même en combinant le premier moyen avec l'un des deux autres.

Mais le premier moyen, seul ou combiné, apportera souvent des entraves dans la circulation ; le dernier aurait dans beaucoup de cas les inconvénients déjà exposés ailleurs ; l'emploi de machines de renfort, qui sont placées à l'arrière-train et agissent en poussant, parait préférable sur les chemins à *grande vitesse*.

Toutefois, en Angleterre l'on a entremêlé, *sans machine de renfort*, des plans inclinés de $\frac{1}{115}$ à $\frac{1}{280}$ dans des chemins à *grande vitesse* exécutés ou projetés. On a cité une machine locomotive qui traînait 26 tonneaux de charge utile, avec une vitesse de 16 à 18 lieues par heure (17 à 20 mètres par seconde), sur un terrain de niveau ; et qui avait pu gravir un plan incliné de $\frac{1}{98}$ de pente et de 1800 mètres de longueur totale, en possédant encore au haut du plan 3 ou 4 mètres de vitesse par seconde.

Une précaution utile, quand on veut se dispenser de machines de renfort ou autres moyens de franchir les pentes roides, c'est de faire précéder ces pentes par des paliers horizontaux ou par des descentes de 1000 à 1200 mètres de longueur au moins, sur lesquelles les convois acquièrent une grande vitesse.

*Transports dans les deux sens.*

Ce qu'on a dit pour les transports dans le sens ascendant, s'applique aux transports dans les deux sens; seulement ceux-ci peuvent quelquefois utiliser, dans les plans inclinés, la descente des convois chargés venant dans un sens, pour la remonte des convois vides marchant dans l'autre.

Dans cette catégorie de transports se trouvent évidemment ceux des voyageurs.

Système dit *réciprocating*. — Figures 151 des planches.

On a imaginé en Angleterre, pour ce genre de chemin, un système appelé *réciprocating* (ou par réciprocité), qui dispenserait de machines locomotives et de chevaux, serait applicable à toutes espèces de pentes, mais qui ne pourrait convenir qu'à des vitesses ordinaires, et pour des transports où la moindre durée du trajet ne serait pas une condition principale.

Ce moyen consiste : à diviser la ligne totale du chemin de fer en parties de 2000 à 2500 mètres de longueur; et à placer à chaque point de division une machine à vapeur fixe, en la faisant agir sur deux tambours horizontaux A et B, placés en travers du chemin sur un échafaudage. Ces tambours, à la suite l'un de l'autre sur le même axe, peuvent à volonté être chacun liés à l'arbre de rotation mu par les machines, ou en être rendu indépendants. On passe de l'avant à l'arrière de la station par des voies de raccordement sur chaque rive du système de tambours.

Pour comprendre le jeu du système, il faut considérer à la fois trois stations : l'une intermédiaire (A, B); l'autre en avant de la précédente (A′, B′); et la troisième en arrière (A″, B″). Le train venant de la station (A′, B′) est tiré vers la station centrale (A, B) par le tambour A à l'aide d'une corde d'avant; mais ce train est suivi d'une corde d'arrière qui se déroule sur le tambour A′, indépendant alors de son axe de rotation. Quand le train en mouvement est arrivé en (A, B), on le décroche; et il attend qu'une manœuvre analogue, faite avec le tambour B, ait amené du sens opposé un train venant de la station (A″, B″) : alors chacun des deux trains est poussé à bras dans la voie principale que l'autre quitte; les cordes d'arrière des stations (A′, B′) et (A″, B″) deviennent cordes d'avant de chaque train; et en rattachant à leurs axes les tambours A′ et A″ tout à l'heure libres, on fait agir les machines à vapeur fixes correspondantes, et de manière à conduire l'un des trains de (A, B) vers (A″, B″), et l'autre

de ( A , B ) vers ( A', B'); chacun d'eux trainant après lui des cordes d'arrière appartenant à la station ( A , B ).

On voit qu'il y a toujours une halte d'attente pour un des trains; on l'épargnerait en augmentant la force des machines fixes, assez pour que les deux tambours A et B pussent être liés *à la fois* à l'axe de rotation, et appeler en même temps les trains venant l'un de la station ( A', B' ), l'autre de la station ( A", B" ).

Les chemins de fer à *médiocre* vitesse, sont ceux dont la moyenne vitesse du trajet est au-dessous de 4$^m$,50 par seconde, ou de 16 kilomètres à l'heure, qui est la plus grande vitesse qu'on puisse obtenir des chevaux relayés dans les routes ordinaires par la poste. Les chemins de fer *à grande vitesse*, qu'un savant illustre a qualifiés de *chemins à vapeur*, sont au-dessus de cette limite, et dans des chemins existants, cette vitesse a été jusqu'à 12 et 15 mèt. par seconde ou 43 à 54 kilom. à l'heure, et même extraordinairement, jusqu'à 26 mèt. par seconde, 63 kilom. à l'heure. Mais, outre que les très-grandes vitesses ne peuvent être obtenues qu'avec des machines plus fortes, plus lourdes, et consommant beaucoup plus de charbon et d'eau; elles augmentent la résistance de l'air, celle des frottements au moins dans les parties courbes, usent les chemins et les véhicules en très-peu de temps, et surtout multiplient les chances d'accidents graves. Chemins à médiocre et grande vitesse.

Sur les chemins de fer projetés, et devant servir à la fois aux marchandises et voyageurs, dans les proportions indiquées ci-dessous, les vitesses moyennes de trajet (y compris les pertes de temps), et pentes maximum par mètre, ont été calculées comme suit :

| DÉNOMINATION des chemins de fer projetés. | CONVOIS *approximatifs* des marchandises qui parcourront annuellement toute la ligne. | | TRAINS *présumés* de 100 voyageurs | | VITESSE MOYENNE CALCULÉE | | | | PENTE moyenne totale par mètre. | PENTE moyenne par mètre la plus forte sans machine de renfort ou plan incliné. | RAYON de courbure minimum des raccordements. | RAPPORTS des longueurs des parties curvilignes à la longueur totale. | RÉDUCTIONS sur les prix de transport actuels par terre évaluées approximativement. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | des convois | | des trains de voyageurs | | | | | | |
| | montants. | descendants. | montants. | descendants. | montants. | descendants. | montants. | descendants. | | | | | |
| De Paris à Orléans . . | . . . . . | Double de la monté de Paris à Orléans. | . . . . . . . . . . . | | Vitesse actuelle des messageries . . . . | | Quatre fois la vitesse actuelle . . . . . | | $0^m,00073$ descendante d'Orléans à Paris. | 0,003 | m. 1000 | . . 1/5 . . | 45 pour 100 sur les voyageurs.<br>48 pour 100 sur les marchandises. |
| De Paris à la mer par Pontoise, Rouen, le Havre . . . . . | 291.980 tonneaux entre Paris et le Havre ; 183.960 tonneaux entre Paris et l'Oise ; 78.840 tonneaux de transports intermédiaires . . | | 2190 trains entre Paris et le Havre ; 6750 trains entre Paris et Pontoise. . . . . . | | 28 à 32 kilom. à l'heure, ou $7^m,7$ à $8^m,8$ par seconde. | | 36 à 40 kilom. par heure, ou 10 à 11 mètres par seconde. | | 0,00018 de Paris à la mer. | 0,0035 | 800 | . . 3/7 . . | 25 pour 100 sur les voyageurs.<br>66 pour 100 sur les marchandises. |
| De Paris à la frontière belge par Amiens . | . . 80.330 tonneaux . . | | . . . 2687 trains . . | | 20 kilom. par heure. | . . . . ?. | 40 kilom. par heure. | | 0,000058 de Paris à la frontière. | 0,003 | 1000 | . . . . . | 66 pour 100 sur les voyageurs.<br>60 pour 100 sur les marchandises. |
| De Lyon à Marseille. | 128.140 t. | 90,000 tons. | . . . 700 trains . . | | 25 kilom. par heure. | 32 kilom. par heure. | 38 kilom. par heure. | | 0,00047 de Lyon à Marseille. | 0,003 | 500 | . . 2/5 . . | 16 pour 100 sur les voyageurs.<br>44 pour 100 pour la remonte des marchandises.<br>18 pour 100 pour la descente. |

Sur le nouveau chemin de fer de Paris à Saint-Germain, la vitesse moyenne, quand on ne s'arrête point à Nanterre et à Chatou, est de 10 mèt. par seconde, 36 kil. par heure.

La vitesse moyenne du nouveau chemin de Bruxelles à Anvers est de 41 kilom. à l'heure; la pente maximum y est en remontant de 3 millim. par mètre; il n'y a que deux courbes à petits rayons, l'une de 650 mèt. de rayon, l'autre de 1000 mètres.

---

# RÉSUMÉ DE LA DIX-HUITIÈME LEÇON.

DES VOIES DES CHEMINS DE FER. — DES RAILS. — DES WAGGONS ET VOITURES. — DES MACHINES LOCOMOTIVES. — DES PLANS INCLINÉS AVEC MOTEURS STATIONNAIRES. — DES OUVRAGES D'ART SUR LES CHEMINS DE FER. — DES DÉPENSES PREMIÈRES ET D'ENTRETIEN DE CES CHEMINS.

---

### *Des voies des chemins de fer et des rails.*

Chemins de fer à deux voies, ou à une seule voie.

Les chemins de fer sont à deux voies ou à une seule voie selon l'activité de la circulation; généralement la dépense pour deux voies n'est pas double de celle pour une voie; parce que, entre autres raisons, il faut dans les chemins à une seule voie, à des distances plus ou moins rapprochées des doubles voies accidentelles de raccordement avec la voie principale, et servant de remises ou de gares, dans le cas de convois et trains marchant en sens opposés, ou marchant dans le même sens mais avec des vitesses différentes.

La longueur des gares dépend de celle des convois et trains, et dans les chemins à une voie existants, cette longueur en somme varie, suivant M. l'Ingénieur en chef Minard, de $\frac{1}{8}$ à $\frac{1}{17}$ de la longueur totale du chemin. Ces gares sont inévitables, quoique beaucoup moins nombreuses, même dans les chemins de fer à deux voies, à raison des transports qui se font dans le même sens avec des vitesses différentes.

Les *gares de stationnement et d'évitement* sont indispensables aux têtes des chemins, et aux divers points où l'on doit prendre ou déposer des chargements, enfin aux têtes des souterrains, tranchées et grands rem-

blais où il pourrait y avoir le plus de chances d'accidents. Les positions des *remises* intermédiaires aux précédentes se règlent d'après les heures de départ, et d'après les vitesses calculées des convois marchant dans des sens opposés ou dans le même sens.

Dans l'estimation du chemin de fer de Paris à la frontière belge, sur un développement de 253,325 mèt. pour la ligne principale, et de 582,105 m. y compris les embranchements, les évaluations pour deux voies s'élèvent à 105,503,740 fr., et elles se réduiraient, en ajournant la deuxième voie, à 68,607,200 francs.

Néanmoins, comme le développement de la circulation dû à l'établissement d'un chemin de fer ne peut être prévu à l'avance; dans plusieurs chemins nouveaux, et notamment dans ceux projetés de Bruxelles à Paris, et dans celui qu'on vient de terminer de Saint-Germain à Paris, on a commencé le service des transports par une seule voie, sauf à l'établir sur la deuxième ultérieurement si cela était jugé nécessaire.

Largeurs des voies et entre-voies de rails

La largeur d'une voie de chemin de fer varie dans les chemins exécutés en France et à l'étranger, de $1^m,31$ à $1^m,52$ entre les axes des deux lignes de rails : en Angleterre on l'avait fixée au minimum à $1^m,42$ dans œuvres et à $1^m,55$ hors œuvres. La distance des rails aux bords des fossés, varie de 1 mèt. à $1^m,50$; en sorte que la largeur minimum d'un chemin *à une voie*, compris les deux fossés, est de $3^m,31$.

Dans les grands remblais, où des tassements peuvent exiger la restauration fréquente de la voie principale d'un chemin de fer, M. l'Ingénieur Minard conseille de donner à la route une largeur en réserve sur les deux rives, pour qu'on puisse établir temporairement des lignes auxiliaires latérales.

Les intervalles à laisser entre les deux voies d'un chemin, ou entre une voie unique et une gare d'évitement, dépendent de la largeur des voitures et de l'arrangement des marchandises qu'elles portent. Dans les chemins existants, ces intervalles varient de 1 à 2 mètres; en sorte que la largeur totale d'un chemin *à deux voies*, non compris les fossés, serait au minimum de $5^m,62$.

Voici les dimensions de voies et entre-voies et largeurs totale de *routes* dans quelques chemins de fer à deux voies, pour marchandises et voyageurs, exécutés récemment ou projetés.

| DÉNOMINATION des chemins (à deux voies). | Largeur totale de la route non compris les fossés. | Distance entre les rails d'une même voie, d'axe en axe. | Distance au fossé de la ligne de rails de rive. | Intervalle entre les deux voies, mesuré entre les lignes de rails les plus voisines. |
|---|---|---|---|---|
| De Liverpool à Manchester | 6$^{m}$,62 | 1$^{m}$,48 | de 1$^{m}$ à 1$^{m}$,50 | 1$^{m}$,66 |
| De Bruxelles à Anvers | 8 ,00 | 1 ,75 | 1$^{m}$,375 | 1 ,75 |
| De Paris à Orléans | 7 ,50 | 1 ,50 | 1 ,350 | 1 ,80 |
| De Paris à la mer, par Rouen | *Id.* | *Id.* | *Id.* | *Id.* |
| De Paris à la frontière belge | 8 ,00 | 1 ,75 | 1,375 | 1 ,75 |
| De Lyon à Marseille | de 6$^{m}$,50 à 7,50 | 1 ,50 | de 1$^{m}$ à 1$^{m}$,50 | 1 ,50 |

Les distances des rails de la même voie, et les largeurs d'entre-voies indiquées dans ce tableau, paraissent encore trop faibles. En Angleterre et en Belgique on a remarqué qu'elles s'opposaient à ce qu'on donnât aux machines locomotives une plus grande puissance, *avec la stabilité statique nécessaire*, et avec tout le jeu convenable pour l'installation et la réparation des diverses parties de l'appareil. Au nouveau chemin de Londres à Bristol la voie du chemin de fer est portée à 2$^{m}$,10. Figures 152 des planches.

Sous les viaducs et dans les souterrains, on peut réduire à 0$^{m}$,60 ou 0$^{m}$,70 le jeu à laisser de chaque côté entre les points les plus saillants des chargements de marchandises, et les parois des piédroits des voûtes ; et à 1 mètre les mêmes dimensions si le chemin de fer devait servir aux voyageurs. Dimensions principales des viaducs, ponts et souterrains.

Toutefois, comme on l'a déjà fait observer, l'économie qu'on obtiendrait par des réductions de dimensions serait bien légère comparativement aux entraves qui en résulteraient pour *des modifications ultérieures à faire dans les machines et véhicules de transport*. Déjà l'on prévoit en effet, que sur les chemins de fer les plus anciennement exécutés, on sera forcé d'élargir des viaducs, des souterrains, d'étendre des remblais, de déplacer et replacer toutes les lignes de rails.

Pour les chemins de fer à deux voies, de Paris à Orléans, de Paris à la mer, de Lyon à Marseille, la largeur des souterrains et des arches des viaducs a été portée à 6$^{m}$,70 et même 7$^{m}$,30.

Les cheminées des machines locomotives exigent que la hauteur entre le sol du chemin et le dessous des voûtes des souterrains et viaducs soit au moins de 4$^{m}$,50.

Quant aux viaducs qui font passer le chemin de fer par-dessus d'autres routes, la largeur entre les parapets a été fixée à 6$^{m}$,75 pour le chemin de fer de Lyon à Marseille.

L'ouverture du débouché a été, pour le même chemin, réglée à 8 mètres pour le passage des routes royales et départementales, à 6 mètres pour les chemins vicinaux; et la hauteur sous clef à 5 mètres. Dans le chemin de fer de Paris à la frontière belge on a réduit les largeurs de débouché à $3^m,20$, et 6 mètres pour les chemins vicinaux et routes royales et départementales, et la hauteur à $4^m,60$, dimension ordinaire des ponts-levis de la Flandre.

Figures 152 des planches.

L'assèchement d'un chemin de fer est encore plus nécessaire que celui d'un chemin empierré, parce que les rails s'enfonceraient dans un sol humide et y dépériraient rapidement. On donne donc un bombement marqué aux entre-voies, et à l'intervalle des rails d'une même voie, qu'on doit d'ailleurs empierrer si l'on emploie des chevaux pour les transports. Dans les déblais, les fossés latéraux doivent avoir une largeur d'au moins $0^m,70$, et une profondeur telle que le niveau maximum des eaux y soit plus bas que le dessus des gîtes de support des rails.

Fosses des chemins de fer

Les dimensions des fossés aux chemins de fer projetés déjà mentionnés ont été réglées comme suit :

| | LARGEUR des fossés en gueule. | LARGEUR au fond. | PROFONDEUR. |
|---|---|---|---|
| De Paris à la mer | $1^m,50$. | $0^m,50$. | $0^m,50$. |
| De Paris à la frontière belge | 1 ,00. | *Id.* | *Id.* |
| De Lyon à Marseille | $1^m,20$ à $1^m,50$ réduite à $0^m,50$ dans le rocher. | *Id.* | *Id.* |

On empierre latéralement et à l'extérieur des lignes extrêmes de rails de chaque voie, des bandes longitudinales de $0^m,70$ de largeur; l'on applique souvent la même précaution à presque tout l'intervalle des rails de la même voie. Ces empierrements sont exécutés sur un maximum d'épaisseur de $0^m,60$.

Dans plusieurs chemins de fer, on établit une clôture d'isolement en bois sur le bord extérieur du fossé; elle est projetée en haie ou levée de terre dans les chemins de fer de Paris à Orléans et à la mer, et dans celui de Lyon à Marseille.

La pente longitudinale des chemins de fer étant très-faible, l'on ne peut guère les débarrasser des *eaux pluviales* que par des écoulements transversaux, à l'aide de *petits caniveaux* passant sous les rails. Lorsqu'il y a

deux voies, l'on est obligé souvent de faire passer ces caniveaux sous trois lignes de rails, et on les remplit alors de cailloux arrondis. On est dispensé de ces précautions, si le sol est perméable.

Rencontres de deux voies de chemin de fer.

Quand deux voies de chemins de fer se rencontrent, particulièrement dans les raccordements des gares d'évitement, ou dans les passages d'une voie à l'autre dans les chemins de fer à deux voies, et que l'angle est très-ouvert, au delà de 140°, on emploie fréquemment des fourchettes à rotation, ou tringles de fer (nommées *switches* par les Anglais), qui interrompent ou prolongent les rails à volonté.

Figures 153 des planches.

Les fourchettes sont manœuvrées soit par la main de manœuvres préposés, soit par la pression des roues des machines et waggons; des contre-poids les replacent alors dans leur position primitive.

Figures 154 des planches.

L'on se borne quelquefois aussi à faire des coupures dans les rails de l'un des chemins, et la vitesse du mouvement des véhicules sur ce chemin suffit pour qu'ils franchissent ces coupures.

Figures 155 des planches.

Mais si l'angle est au-dessous de 140°, on a recours à des plates-formes horizontales mobiles autour d'un axe vertical et placées à la croisée des deux lignes de chemins. Ces plates-formes prennent dans l'ancienne direction les machines et waggons, et en tournant les placent dans la nouvelle direction. On renvoie aux ouvrages, des auteurs anglais Tredgold et Wood, et de M. l'Ingénieur en chef Minard, pour plus de détails sur ces opérations, ainsi que pour le croisement au même niveau des chemins de fer à médiocre vitesse et des routes ordinaires, représenté dans les figures 156 des planches.

Figures 156 des planches.

*Composition des rails et de leurs gîtes.*

Figures 157 des planches.

On a renoncé en France et à l'étranger, sauf aux États-Unis, pour des chemins de fer *permanents* autres que ceux d'exploitations d'usines et de mines, aux *tram-rails* et *plate-rails*, qui sont formés d'une partie horizontale plate d'environ 9 centimètres de largeur, avec ou sans rebord supérieur vertical de 4 cent. Les *plate-rails* ont quelquefois un renfort en hauteur de 3 à 4 cent. au milieu de leur portée, qui est d'environ 90 cent.; ou une nervure verticale de 7 cent. de hauteur au milieu placée au-dessous de la partie plate. Les roues portent sur la bande horizontale; les rebords intérieurs des *tram-rails* les empêchent de s'écarter de ceux-ci, et repoussent en même temps les petits cailloux lancés par les pieds des chevaux.

Figures 158 des planches.

Ce genre de rails facilite le séjournement de la poussière, de la boue, et augmente de beaucoup les frottements; mais il a l'avantage de rendre les

voitures du chemin de fer susceptibles de servir sur des routes ordinaires; et c'est probablement cette considération qui l'a fait encore employer dans plusieurs chemins de fer récemment exécutés aux États-Unis d'Amérique.

Les *edge-rails*, qui sont adoptés en Europe pour les grands chemins de fer, présentent en relief, au-dessus du sol, la partie du rail sur laquelle les roues tournent; celles-ci ont des rebords qui produisent le même effet que ceux des plate-rails, mais qui s'opposent ici à ce que les véhicules puissent servir sur les routes ordinaires.

Figures 159 des planches.

Les edge-rails ont d'abord été exécutés en barreaux de fonte de fer de $1^m,15$ de longueur; leur section transversale avait la forme d'un T, dont la partie horizontale portait la roue; la partie verticale avait pour but de consolider la première. Pour ménager le métal et obtenir un solide d'égale résistance, on renflait longitudinalement la branche verticale du T par une courbe inférieure.

Supports des rails.

Les extrémités des rails métalliques, en fonte ou en fer, portent quelquefois directement sur les dés outraversines en bois formant les supports du chemin; et cette disposition a été encore suivie dans quelques chemins en fer nouveaux des États-Unis d'Amérique.

Figures 160 des planches.

Mais plus généralement les rails reposent dans des *coussinets*, dits chaises (chairs) en fonte, établis à $0^m,90$ d'intervalle dans la même ligne. Les coussinets sont arrêtés, soit sur des pièces en bois ou en fonte, soit sur des dés en pierre grossièrement taillés, nommés *stones* par les Anglais. Ces stones de $0^m,60$ d'équarrissage environ sur $0^m,30$ de hauteur minimum, sont en pierre dure et inaltérable. Plus ces dés ont de masse, mieux ils remplissent leur destination.

Figures 161 des planches.

Aux États-Unis d'Amérique, on a même remplacé, dans quelques chemins de fer, les dés en pierre, par des blocs ou billots de bois représentés dans les figures 161 des planches.

Dans les chemins de fer projetés par M. Desfontaines, de Paris à Orléans, et de Paris à la mer, cet Ingénieur propose d'intercaler, entre la pierre et le terrain, une couche d'empattement en béton, de 20 cent. d'épaisseur maximum; ce béton étant formé de $\frac{4}{5}$ de pierrailles, et $\frac{1}{5}$ de mortier hydraulique.

Figure 162 des planches.

Les *semelles en bois transversales*, surtout si elles sont reliées par des pièces orthogonales sous chaque ligne de rails, ont l'avantage de mieux répartir la charge mobile sur le terrain naturel ou artificiel, de relier les deux rangs de rails, et de s'opposer plus efficacement à leur déformation. Leur masse étant moindre que celles des stones, elles vibrent plus facile-

ment sous le passage des fardeaux; toutefois cette élasticité entre certaines limites est elle-même favorable, particulièrement sous le rapport de l'usure des rails et des véhicules. Aussi l'on se sert temporairement des semelles en bois dans les grands remblais, et même on les a adoptées comme supports définitifs aux nouveaux chemins de fer de Bruxelles à Anvers, et de Paris à Saint-Germain, et dans un grand nombre de chemins récemment exécutés aux Etat-Unis malgré les chances de leur renouvellement à 21 ou 15 années d'intervalle.

On avait pensé qu'une aire générale en maçonnerie eût été préférable à des supports isolés; mais on a dû abandonner cette idée, parce que l'usure du chemin et du matériel d'exploitation eût été bien plus rapide: car une base résistante, non compressible ni élastique, eût *produit l'effet d'une enclume.*

Aux États-Unis d'Amérique, où le bois est en grande abondance et à bas prix, on l'a employé, non-seulement pour la tenue directe des coussinets des rails, mais même pour suppléer à l'absence des terres de remblais, ou pour franchir des terrains marécageux qui n'auraient pu supporter la charge de ces terres. Les figures 163 des planches représentent des chevalets de support de diverses formes. Figures 163 des planches.

Les dimensions des *chaises* et *coussinets* varient suivant leur espacement, le poids des rails et celui des véhicules. Dans les chemins exécutés; leur largeur dans le sens longitudinal est comprise entre 9 et 13 centimètres, et leur poids entre 3 kilog. et 6$^{kil.}$,50 : on les a évalués à 6$^{kil.}$,20 et 7 kilog. dans les projets des chemins de fer de Paris à Orléans, de Paris à la mer, et de Lyon à Marseille.

Les dimensions et le poids des barreaux des rails en fonte dépendent de l'espacement des chaises et du poids des waggons. Si on ne les considère que comme portés sur deux appuis et chargés à leur milieu dans le cas le plus défavorable, du poids d'un waggon ou d'une locomotive, on calculera leurs dimensions par la formule $P = \frac{2}{3} R. \frac{be^2}{L}$, où P est la charge, L la longueur, *b* la hauteur du métal, *e* sa largeur, et R la résistance par unité superficielle. Rails en fonte de fer.

Mais comme les rails sont exposés à des chocs, et qu'une grande vitesse peut augmenter les efforts qu'ils supportent, on a cherché directement quel était le coefficient R dans les chemins de fer existants, d'après les plus fortes charges éventuelles, et l'on a trouvé R = 14 kilogrammes par

millimètre carré dans le chemin anglais de Darlington. L'expérience y avait prouvé : que des rails en fonte pesant 22 kilog. le mètre courant, de 1m,15 de distance d'appuis, de 5c,5 de largeur horizontale, 12 cent. de hauteur moyenne, et de 2c,6 d'épaisseur réduite, avaient résisté depuis longtemps à des waggons chargés pesant 4000 kilog., et à des locomotives pesant 8000 kilog., et ayant 4 mètres de vitesse par seconde.

Ce chiffre de 14 kilogr. pourrait donc servir à calculer les dimensions homologues des rails de formes semblables, placés dans des conditions différentes d'espacement d'appuis, et de poids à supporter.

Cet espacement dépend d'ailleurs des prix relatifs de la fonte de fer et des supports en pierre ou en bois dans les différentes localités, et doit être d'autant plus petit que la fonte y est à un prix plus élevé.

Les fréquentes ruptures des rails en fonte, surtout par les changements brusques de température; leur usure qui, d'après des expériences comparatives, est bien plus grande que celle des rails en fer forgé; l'impossibilité de leur donner une longueur plus grande que l'intervalle entre deux coussinets, à cause des chances de rupture par choc, ou par dénivellation des supports; le grain raboteux de la fonte, qui augmente de beaucoup les frottements; enfin sa moindre élasticité et sa moindre résistance, ont déterminé à préférer les rails en fer forgé, surtout depuis que le laminage des fers a donné la facilité de *les étirer immédiatement sous la forme que doivent avoir les rails.*

Rails en fer forgé. Les expériences faites sur les rails en fer forgé du chemin de Liverpool, qui pèsent 17kil.,50 le mètre courant, dont la portée entre coussinets est de 0m,91, la largeur sur le dessus, 5c,5, la hauteur moyenne 8c,3, et l'épaisseur réduite 3 cent., ont conduit à attribuer au coefficient R déjà cité, la valeur de 20 kilog. par millimètre carré pour les rails en fer forgé et sous les plus grandes charges *éventuelles.* Toutefois, dans quelques chemins de fer des États-Unis, les rails pèsent de 17kil.,90 à 20kil.,40 par mètre courant; et dans les projets de chemins de fer de Paris à Orléans, de Paris à la mer et la frontière belge, et de Lyon à Marseille, on a pris le chiffre de 20 kilog. par mètre courant, déjà adopté pour le chemin de Bruxelles à Anvers, pour des intervalles de coussinets de 0m,914. Enfin dans quelques chemins de fer actuellement en exécution en Angleterre, on a porté le poids jusqu'à 30 kilog., et même jusqu'à 36 kilog. le mètre courant.

Cet accroissement de force correspond à l'emploi de machines et de véhicules de transport plus forts et plus lourds.

La section transversale uniforme des barreaux de fer du nouveau chemin de Saint-Germain à Paris est à peu près de la forme d'un T; mais la partie plate inférieure est moins large que la partie plate supérieure.

Dans les chemins de fer de Paris à Orléans et à la mer, projetés par M. l'Ingénieur en chef Desfontaines, les rails doivent avoir 5 mètres de longueur, porter sur cinq coussinets intermédiaires chacun du poids de $6^{kil.}$,20, et sur deux extrêmes de raccordement du poids de $6^{kil.}$,70; ces coussinets ne sont pas équidistants dans l'intervalle des 5 mètres; et leurs intervalles sont réglés deux à deux à 72, 83 et 95 centimètres des extrémités vers le milieu.

On a employé deux genres de rails en fer forgé; les uns ont la même section transversale sur toute leur longueur; les autres sont progressivement plus épais verticalement depuis les extrémités jusqu'au milieu, et sont ainsi ondulés en dessous sur leur longueur totale. Les économies de matière que l'on obtient dans ce deuxième système sont bien atténuées par le prix de confection qui est plus élevé que pour les rails à section uniforme. Figures 164 des planches.
Il reste à ceux-ci le grand avantage, de ne point entraver l'écoulement des eaux de la chaussée intercalaire aux rails, de se prêter à des variations considérables dans l'espacement des *chairs*, et au placement des *chairs* auxiliaires.

La liaison des stones avec les coussinets, et de ceux-ci avec les chairs, doit laisser un léger jeu pour la dilatation des métaux, et pour éviter les ruptures en cas de chocs. Pour la première de ces liaisons on se sert de chevilles en fer enfoncées dans des cylindres en bois (et mieux vaudrait en plomb) scellés dans la pierre. Pour la deuxième, on a recommandé tantôt l'emploi de cales en fer forgé ou en fonte, et tantôt celui de coins en bois. Ces derniers, à cause de la compressibilité du bois, paraissent préférables, à moins qu'on ne se serve de lames de plomb ou de zinc pour garnir les cales métalliques.

Avant de poser les rails en fonte ou en fer forgé, on en éprouve quelques-uns pris au hasard, soit par la pression, soit par le choc; mais on s'arrête à la limite où l'élasticité du métal se trouvant altérée, les déformations seraient permanentes.

Il est évident au reste qu'il y a une grande économie à utiliser les coussinets et rails définitifs à former des chemins de fer provisoires sur traverses en bois pour les mouvements des terres, et pour ceux des matériaux employés aux ouvrage d'arts qui dépendent du chemin de fer. Au nouveau chemin de fer de Saint-Germain à Paris l'ordre du travail a été réglé sous ce rapport d'une manière très-judicieuse.

*Des waggons et voitures.*

Figures 165 des planches

Les waggons et voitures ont une forme dépendante de la nature des objets qu'ils doivent transporter. Les waggons qui servent dans les travaux de terrassement *font généralement bascule* comme les tombereaux ordinaires ; et sont tirés, à volonté, dans les deux sens. Souvent l'axe est fixé au coffre et les roues tournent dans leur moyeu.

Dans les waggons à houille, le coffre est un tronc de pyramide renversé qui se vide par le fond.

Le chargement utile d'un waggon est ordinairement de trois tonneaux, auquel il faut ajouter de 1 ton. à 1t,20 pour le poids de ce véhicule; ainsi ce poids, comparé à la charge utile, ne présente pas d'améliorations comparativement aux voitures des routes ordinaires, ni *à fortiori* aux *bateaux employés à la navigation.*

Figures 166 des planches.

Les voitures sont : 1° découvertes comme des chars-à-bancs; 2° fermées comme des diligences, mais non garnies ; 3° fermées, couvertes et garnies comme les diligences ordinaires. Elles fournissent de 18 à 20 places, et leur poids à charge pleine est de beaucoup au-dessus de celui des waggons.

Les waggons voyagent par convois de 12 à 15, et les voitures pour les voyageurs par convois de 10 à 11 plus ou moins, suivant la force des machines locomotives, et les rampes du chemin.

Les waggons et voitures sont liés par des chaînes solides en fer, et maintenus à distance par les prolongements *tamponnés* avant et arrière des brancarts des châssis ; ils peuvent dès lors être traînés ou poussés par le moteur. L'expérience a prouvé qu'il y avait toutefois de l'avantage à faire agir la force motrice par traction.

Les waggons et voitures peuvent aussi se prêter un mutuel secours. On a remarqué d'ailleurs que dans les passages du repos au mouvement, et *vice versâ*, comme dans les modifications de vitesse, le changement n'était pas simultané dans tous les véhicules d'un train, et qu'il y avait une succession de chocs de l'un à l'autre.

Dans les waggons et voitures des grands chemins de fer, les roues, en fonte de fer, sont fixées à l'essieu en fer ; celui-ci tourne dans des coussinets attachés au bâtis, et qui sont en fonte de fer ou en cuivre jaune. Les pertes de forces sont atténuées d'autant plus que le rapport du diamètre des roues à celui de l'essieu est plus grand, et que les essieux sont mieux entretenus de graisse ou d'huile. Dans les waggons des chemins de fer les plus récents,

ce rappprt est de 13 à 15 pour 1; c'est-à-dire que le diamètre des essieux tournés en fer forgé étant de 5 à 7 centim., celui des roues en fonte de fer est de 65 à 105 centimètres.

La tendance actuelle est d'augmenter progressivement le diamètre des roues, réglé originairement à 1$^m$,50; il sera probablement porté à 2$^m$,40 sur le chemin de Londres à Bristol; et l'on arrivera aussi par-là à de plus grandes vitesses de transport, sans être forcé d'augmenter le nombre déjà trop grand des oscillations des pistons à vapeur.

Les deux essieux de chaque waggon ou voiture doivent être plus espacés que les coussinets des rails, afin que le poids du waggon en repos porte sur six appuis, et que chaque intervalle entre deux coussinets successifs ne soit chargé que du quart du poids du waggon.

Les waggons et voitures sont munis du reste de freins pour modérer la vitesse dans les descentes.

Les waggons du chemin de Liverpool portent sur des ressorts; le corps de leurs essieux a 8 centim. de diamètre; mais les extrémités n'ont que 4 centim., parce qu'elles font saillie au dehors des roues, et sont ainsi portées par des coussinets extérieurs à ces roues. Cette disposition doit être imitée, parce qu'elle donne plus de force à l'essieu et plus de stabilité à la caisse; seulement, pour les chemins à double voie et pour les *croisées*, elle exige un peu plus d'entre-voie. Les waggons à ressorts sont au reste employés exclusivement aujourd'hui.

Il parait qu'il y a aussi un grand avantage à mettre des cercles de fer forgé sur *le limbe* des roues en fonte, qui touche le dessus des rails.

Frottements des essieux.

L'auteur anglais Wood a trouvé que le frottement des essieux des roues était entre les limites de $\frac{1}{40}$ à $\frac{1}{34}$ de la pression, et descendait même jusqu'à $\frac{1}{60}$ par l'emploi de coussinets en cuivre poli. Coulomb avait posé $\frac{1}{10}$; et M. le capitaine d'artillerie Morin, dans ses nouvelles expériences sur le frottement, a trouvé que ce frottement qui était de 0,07 à 0,09, avec enduit, renouvelé par intervalles, en huile, saindoux, suif ou camhonis; s'élevait à 0,19 et même à 0,25 lorsque les surfaces étaient plus ou moins humides. M. l'Ingénieur Virla (voir le mémoire inséré aux *Annales des ponts et chaussées* de 1835) a trouvé pour des essieux neufs, un frottement de $\frac{1}{5}$; pour des essieux usés, des valeurs comprises entre $\frac{1}{10}$ et $\frac{1}{15}$; et pour des essieux légèrement faussés $\frac{1}{6}$.

Frottements des roues sur les rails.

Quant aux frottements des roues sur les rails, l'auteur anglais Wood n'ayant dirigé ses recherches que sur des rails neufs parfaitement droits, et

non sur des rails ordinaires de chemins de fer pratiqués depuis longtemps, est arrivé à renfermer le frottement entre les limites $\frac{1}{185}$ et $\frac{1}{273}$ de la pression; et à adopter définitivement $\frac{1}{300}$ pour le roulage ordinaire des roues sur des plate-rails; et $\frac{1}{235}$ pour les waggons sur *edge-rails*. M. l'Ingénieur Virla, dans le mémoire cité ci-dessus, évaluant le frottement par une méthode qui lui est due, et qui consiste à l'apprécier d'après le temps du trajet au bout duquel une vitesse initiale imprimée aux waggons était complétement éteinte, est arrivé, pour des *tram rails* secs disposés suivant une courbure de 350 mèt. de rayon, à un frottement compris entre $\frac{1}{123}$ et $\frac{1}{273}$, et pour les mêmes rails mouillés, à une valeur comprise entre $\frac{1}{186}$ et $\frac{1}{250}$.

M. l'Ingénieur Minard, dans son Essai sur les chemins de fer, cite des chemins existants où les waggons ne commencent à se mettre en mouvement que sur des pentes de $\frac{1}{404}$ à $\frac{1}{166}$; il fait observer que la pluie, la neige, le vent par son action oblique, peuvent augmenter les frottements ordinaires de plus de $\frac{1}{6}$. Il propose, en conséquence, de s'en tenir au rapport $\frac{1}{180}$ déjà adopté en 1830 par les Ingénieurs anglais.

Feu M. Navier, partant des résultats publiés dans l'ouvrage de M. Guyonneau de Pambour, a adopté la fraction $\frac{1}{160}$, que M. l'Ingénieur en chef K'maingant a réduite à $\frac{1}{150}$ dans le projet de chemin de fer de Lyon à Marseille.

L'auteur anglais Wood a cru pouvoir conclure de ses expériences, que le frottement était indépendant de la vitesse; mais il n'a opéré que sur des vitesses très-médiocres, le tiers de celles des voitures-diligences dans les chemins de fer. Il est probable qu'indépendamment de la résistance de l'air qui croît comme les carrés des vitesses, les chocs et secousses dus aux imperfections et dégradations des rails, croissent aussi en pareille raison de la vitesse; et que le frottement total se compose d'une partie constante indépendante de la vitesse, et d'une partie au moins proportionnelle au carré.

*Des machines locomotives.*

Ces machines sont à pression moyenne ou haute, sans condensation et à vapeur perdue. Elles sont portées par un chariot muni de quatre à six et même huit roues. L'expérience du chemin de fer de Bruxelles à Anvers

Figures 167 des planches.

paraît donner un avantage marqué aux chariots à six roues. Les pistons des cylindres font mouvoir des manivelles attachées à l'essieu des roues. Ces machines traînent après elles un allége, nommé *tender* par les Anglais, lequel

transporte l'eau d'alimentation et le combustible, qui est du charbon de terre brut ou distillé (*coke*). Il existe de nombreuses variétés de ces machines, et l'on trouve, dans les *Annales des ponts et chaussées* de 1831, 1832, 1334 et 1835, des épreuves comparatives ainsi que des relevés des consommations et frais de quelques-unes d'entre elles. Les rapports des diamètres des essieux et des roues sont d'ailleurs ici les mêmes que dans les waggons.

L'auteur anglais Wood posait comme effet utile d'une machine locomotive de la force de 10 chevaux (cheval vapeur = 75 kilog. élevés à 1 mèt. par seconde) 20 à 28 ton. de poids net (défalcation faite du poids propre de la machine, de son allége et des waggons), transportés sur un chemin de niveau, avec une vitesse de 6m,70 par seconde.

Au chemin de Liverpool à Manchester, une machine de la force de 24 chevaux a transporté 49 ton. de charge *utile*, avec une vitesse de 5 mèt., sur un terrain de niveau; ce qui s'éloigne peu des chiffres de Wood.

L'ouvrage remarquable de M. Guyonneau de Pambour, sur les machines locomotives, a donné des notions plus exactes, d'après lesquelles M. Navier a pu établir les formules relatées précédemment.

La force des machines et leur poids ont déjà éprouvé de grandes variations : à l'origine elles étaient de 8 à 10 chev. et pesaient 4ton.,50 à 5ton.,60; elles sont maintenant arrivées à 24 chevaux, et à 15 ton. et 18 ton. de poids, et il paraît même que l'on a été jusqu'à 50 chevaux. Les paires de roues adhérentes ne portaient que 5 tonneaux, elles vont être chargées de 8 tonneaux. Le nombre des locomotives, y compris les rechanges, est très-considérable. Il est de trente sur le chemin de Liverpool à Manchester, qui n'a que 47 kilomètres de longueur.

Sur le chemin en fer projeté de Lyon à Marseille, pour traîner sur un terrain de niveau une charge brute de 80 tonneaux, y compris la machine et son allége, avec une vitesse de 12 mètres par seconde environ, M. l'Ingénieur en chef K'maingant a basé ses calculs sur l'emploi de machines de 0m,279 de diam. de cylindres; 1m,525 de diam. de roues; 0m,406 de course de piston, et 12m. q.,50 de surface de chauffage; ayant une pression de vapeur de 1kilog.,291 par centim. quarré sous le piston du cylindre; pesant 8ton.,40, non compris l'allége compté pour 5 ton.; et consommant 542 kil. de coke par heure.

Un fait fort important avait été annoncé par M. Booth dans la notice historique sur le chemin de fer de Liverpool à Manchester (*Annales des*

*ponts et chaussées* de 1831). Cet auteur attribuait à l'introduction de la vapeur perdue, dans la cheminée de la chaudière, une action importante sur le tirage de la cheminée, et sur la combustion dans le foyer, qui était excitée alors comme par une soufflerie mécanique. Ce fait paraît confirmé par les observations de M. Guyonneau de Pambour ; elles établissent que la production de vapeur dans la chaudière, qui augmentait avec la surface de chauffe, croissait aussi avec la vitesse.

MM. les Ingénieurs Polonceau et Bellanger, dans un mémoire publié en février 1836, sur le chemin de fer de Paris à Rouen et au Havre, ont représenté la quantité de vapeur produite dans les chaudières locomotives par $Q=S(Vx+y)$, où S est la surface de chauffe, V la vitesse de la machine, $x$ et $y$ des coefficients qui seraient 0,0014 et 0,022.

Un fait plus avéré encore, c'est que dans les machines à pression moyenne à vapeur perdue, il y a une vitesse normale qui correspond dans chacune, suivant son système et son exécution, au maximum d'effet utile, en deçà et au delà de laquelle cet effet décroît, d'abord par degrés peu sensibles, mais qui deviennent ensuite de plus en plus considérables.

C'est dans l'ouvrage de M. Guyonneau de Pambour que l'on doit rechercher les considérations théoriques et pratiques les plus essentielles sur les machines locomotives.

### *Des plans inclinés avec moteurs stationnaires.*

On trouve, dans les *Annales des ponts et chaussées* de 1831, des documents comparatifs sur les machines stationnaires et les machines locomotives ; et des détails techniques sur les premières sont consignés dans les ouvrages de Wood et Tredgold, et dans l'*Essai sur les chemins de fer* de M. l'Ingénieur en chef Minard.

Les machines fixes motrices sont généralement à pression moyenne, sans condenseur et à vapeur perdue, afin qu'elles puissent agir avec plus d'énergie par intervalles. On compte au moins 3' de temps perdu entre chaque reprise de mouvement. Au plan incliné de Brusselton on a tiré partie de la force des waggons descendants à vide pour aider la machine fixe à monter les waggons pleins.

Voici les résultats de quelques machines stationnaires employées aux plans inclinés, on les a puisés dans l'ouvrage de M. l'Ingénieur en chef Minard.

| DÉSIGNATION DES CHEMINS. | Force des machines | PLANS INCLINÉS | | DIAMÈTRE de la corde de tension. | MOUVEMENT ORDINAIRE | | OBSERVATIONS. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | longueur. | pente. | | Poids des waggons chargés en montant. | Vitesse moyenne. | |
| | Chevaux. | mètres. | | mètres. | kilogrammes. | mètres par sec. | La machine de Liverpool pourrait faire monter jusqu'à 40,000 kil.; celle de Sainte-Hélène 32,000 kil.; et celle d'Yvri 14,400 kil. |
| De Liverpool à Manchester. | . 50 . . | 1,800 | 1/48 | 0,047 | 25,000. . | 3,19. | |
| De Saint-Hélène à Runcorn.. | . 40 . . | 400 | 1/10 | *id.* | 24,000. . | 1,66 | |
| De Cantorbéry. . . . . . . . | . 25 . . | 3,000 | 1/26 | 0,043 | 40,000. . | 2,78. | |
| *id* . . . . . . . . . . . . | . 25 . . | 1,610 | 1/41 | *id.* | 16,800. . | 3,57. | |
| D'Yvri à Épinac. . . . . . . | . 25 . . | 300 | 1/17 | 0,100 à 0,200 | 10,800. . | 0,50. | |

L'installation des plans inclinés avec moteurs stationnaires consiste généralement : à placer au haut du plan incliné, sur un échafaudage assez élevé pour que les waggons à vide puissent passer dessous, des tambours ou grandes poulies depuis $1^m,50$ jusqu'à 4 mètres de diam., à volonté dépendants et indépendants d'un axe de rotation transversal mu par la force stationnaire, et pouvant même glisser parallèlement à cet axe. Figures 168 des planches.

Si le chemin de fer est à une voie, il n'y a qu'une seule voie non plus sur le plan incliné, avec gares d'évitement en haut et en bas; les waggons chargés ou voitures sont attachés à une corde de traction. Quand elle est rendue au bas, le tambour est lié avec l'axe de rotation, et fait monter le convoi; quand ce dernier est arrivé au sommet, on décroche la corde, et la vitesse acquise fait avancer les waggons dans la voie rectiligne, où ils reprennent leur voyage.

Pendant que les waggons chargés montent, les waggons vides, arrivant d'un sens opposé, ont été amenés sous le tambour; de là ils sont poussés à bras dans la voie par laquelle ils doivent descendre; on y accroche la corde des waggons pleins, on dégage le tambour de son axe, et les waggons en descendant, par leur poids, amènent avec eux la corde de traction qui servira ultérieurement pour un nouveau convoi de waggons venant dans le sens opposé.

Si le chemin de fer est à deux voies, on emploie une corde sans fin, dont une partie monte lorsque l'autre descend, et dont on maintient la tension, malgré les variations atmosphériques, par un contre-poids qui peut descendre dans un puits.

On modifie convenablement les manœuvres lorsque la machine est placée au sommet de deux plans inclinés opposés, ou lorsqu'on fait servir le poids des waggons descendants à la remonte de ceux qui vont en sens contraire.

Les waggons descendants ne peuvent être retenus que par le frein; quant aux waggons ou voitures montants, qui descendraient en cas de rupture de la corde, on emploie divers moyens pour prévenir les accidents, et entre autres, des *traîneaux hérissés de pointes* placés derrière le dernier waggon, qui frottent sur le plan incliné et s'y enfoncent quand le chariot recule, ou des coins de bois remplissant l'angle *mixtiligne* entre les rails du plan incliné et les roues ordinaires du dernier waggon, et toujours prêts à s'opposer au recul.

Les frottements, la roideur des cordes sur le plan incliné, et dans les gorges des poulies, l'usure rapide de ces moyens de traction, sont un des inconvénients graves des plans inclinés avec moteurs stationnaires.

*Des ouvrages d'art sur les chemins de fer.*

Ces ouvrages sont soumis aux mêmes conditions générales que ceux des routes et des canaux. Toutefois, le système de suspension n'est guère applicable aux ponts et viaducs par lesquels un chemin de fer traverserait un pont ou une route ordinaire. Les flexions d'*élasticité* qu'éprouveraient des ponts à grande portée en charpente, en fer forgé et en fonte de fer, doivent aussi les faire écarter.

Sur de petites portées, ce genre de construction a l'avantage de réduire au minimum la hauteur entre le dessus de la chaussée du pont et le sommet du vide à réserver en dessous, de se prêter aux directions biaises, et de dispenser souvent de relever ou de dévier soit le chemin de fer, soit les routes qui doivent le franchir.

On a déjà dit quelles devaient être les dimensions du débouché d'un souterrain pour le passage d'un chemin de fer.

Figures 169 des planches. Les figures 169 de l'atlas représentent quelques-uns des souterrains exécutés en France et en Angleterre; on trouvera des détails sur leur mode d'exécution à la section de la navigation intérieure.

Les tranchées ont été préférées aux souterrains dans les projets de chemin de fer de Paris à Orléans et à la mer pour des profondeurs au-dessous de 26 mètres.

Dans le mémoire à l'appui du chemin de fer de Paris à la frontière belge, M. l'Ingénieur en chef Vallée a posé l'équation $Pm = amp + plmx + px^2$, qui détermine la profondeur $x$ de tranchée pour laquelle il y a égalité d'avantages à faire une tranchée ou à exécuter un souterrain; P est le prix du mètre courant de souterrain, $p$ le prix du mètre cube de déblais, $l$ la lar-

geur du chemin de fer en couronnement, augmentée de celle des fossés comptée pour 3 mèt., $a$ est le déblai disponible à la hauteur du plan horizontal des arêtes extérieures du chemin, $\frac{x}{m}$ est la largeur d'un des talus de la tranchée. Faisant diverses hypothèses sur $p$ et P, on obtient les valeurs correspondantes de $x$, qui varient depuis 10 mètres jusqu'à 25 mètres.

Dans les projets de chemins de fer déjà cités, le mètre courant de souterrain pour deux voies, non compris les deux têtes, a été évalué, lorsqu'ils ne doivent être que percés dans le rocher, de 250 à 500 francs, suivant la nature du rocher; et de 600 fr. à 900 fr. pour un souterrain percé et de plus revêtu en maçonnerie. Toutefois, ce prix de revient s'est élevé jusqu'à 2.600 fr. dans des souterrains d'une grande longueur pratiqués dans de mauvais terrains.

Les chemins de fer à grande vitesse réclament dans leur trajet des dépôts d'eau et de charbon ou coke, dans lesquels les machines locomotives puissent s'approvisionner sans retards; des châteaux d'eaux, et magasins de combustible doivent donc être répartis suivant la vitesse moyenne des machines, leur consommation, et la capacité de l'allége.

Les chemins de fer de toute espèce ont besoin de bureaux de perception et de logements de cantonniers analogues aux maisons d'éclusiers. M. l'Ingénieur en chef K'maingant a supposé qu'un cantonnier de chemin de fer à deux voies aurait à surveiller 4000 mètres de longueur.

Enfin, l'exploitaton des transports sur un chemin de fer exige des lieux d'entrepôt et de stationnement pour les marchandises et voyageurs aux diverses stations, des hangars et des ateliers considérables pour remiser et réparer les waggons, diligences et machines; enfin des bureaux pour l'administration centrale.

Système de chemins du major Palmer.

Avant de terminer ce qui est relatif aux chemins de fer ordinaires, on dira quelques mots du système proposé par le major Palmer, et décrit en 1823 par M. l'Ingénieur Cordier, dans l'ouvrage intitulé : *Essai sur la construction des routes*. Ce système est représenté par les figures 170 des planches. On voit que la charge des véhicules est placée en dessous des roues auxquelles elle est suspendue, et que les rails se trouvent ainsi partout au-dessus du terrain. M. Palmer distribue cette charge sur les deux côtés d'une espèce de *harnois*, afin de pouvoir réduire les deux lignes ordinaires de rails à une seule. Le tirage se fait par des chevaux hâlant sur les rives du chemin et marchant sur le sol en contre-bas. Il ne parait pas qu'on ait fait des applications de cette idée plus ingénieuse que praticable.

Figures 170 des planches.

*Des dégradations et de l'entretien des chemins de fer.*

M. l'Ingénieur en chef Minard a analysé avec une rare sagacité, dans son *Essai sur les chemins de fer*, les diverses causes de leurs dégradations.

Il a indiqué :

1° Le choc des roues contre les légères saillies des rails, comme la cause principale du mouvement progressif de translation des rails de l'amont à l'aval, surtout dans les pentes un peu fortes.

2° Les roues mal centrées, les changements de voie, les temps d'arrêt et de mise en jeu des trains de waggons et de voitures, la force centrifuge dans les parties courbes, comme les causes principales des frottements latéraux et de l'écartement des deux lignes de rails.

3° L'enfoncement des stones, la flexion des rails sous la pression de fortes charges animées de grandes vitesses, comme hâtant les déplacements et dénivellations des autres stones, et augmentant les frottements passifs dans une forte proportion.

Les réparations consistent principalement à relever des *stones affaissés*, et lorsque ce travail doit s'exécuter sur une grande longueur, il faut préparer nécessairement un chemin latéral auxiliaire.

Les rails déviés hors de la voie, défectueux ou même brisés, se redressent et se remplacent en enlevant les coins qui les retiennent.

Il en est, au reste, dit M. Minard, de l'entretien des chemins de fer comme de celui des routes : on ne conserve la viabilité, on n'empêche des dégradations rapidement progressives que par des réparations immédiates, continues, confiées à des ateliers spéciaux de deux ou trois hommes réunis.

Sur le chemin de Liverpool il y a deux ouvriers par 1200 mèt. de simple voie, outre les cantonniers chargés de tenir libre le passage des rebords des roues et de nettoyer le dessus des rails.

Au nouveau chemin de Saint-Germain, les cantonniers stationnés de distance en distance avertissent, par des signes convenus, de l'état de la route sur toute son étendue.

Aux États-Unis d'Amérique, des gardiens stationnés transmettent les mêmes avis au moyen de signaux élevés à cet usage sur des mâts, en sorte qu'en quelques minutes une nouvelle est transmise d'une extrémité à l'autre.

On détermine cet exposé sommaire sur les chemins de fer, par un tableau contenant quelques chiffres évaluatifs, utiles pour l'assiette des projets de ces nouvelles voies de communication, et tirés des comptes et projets de chemins de fer les plus récents.

*Dépenses premières approximativement constatées ou prévues.*

| INDICATION DES CHEMINS. | Longueur totale entre les points extrêmes. | DÉPENSES PREMIÈRES RELATIVES AUX CHEMINS. | | | | | | | | DÉPENSES PREMIÈRES relatives au matériel d'exploitation. | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Achats de terrains et indemnités. | Terrassement. | Souterrains. | Ouvrages d'art divers. | Dépenses diverses. | Voies du chemin de fer. | Frais de conduite et de surveillance. | Dépenses totales. | Waggons. | Diligences. | Machines locomotives. | Bâtiments pour ateliers, magasins et bureaux. | Dépenses totales. |
| | kilomèt. | fr. | fr. | fr. | fr. | fr. | fr. | fr. | fr. | fr. | fr. | fr. | fr. | fr. |
| De Liverpool à Manchester (exécuté sur deux voies) | 47 | 2.600 000 | 6,275.000 | 5.800.000 | 3.925.000 | 715.000 | 2.780.000 | 910.000 | 22.805.000 | . . . . . | 700.000 | . . . . . | 1.750.000 | 2.450.000 |
| Londres, grande jonction, Blackwall-Commercial (*id.*) | 11 | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | 30.000.000 | | | | | |
| De Bruxelles à Anvers (à deux voies) | 44 | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | 5.192.000 | | | | | |
| De Louvain à Liége (sur deux voies) | 62 | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | 10.416.000 | | | | | |
| De Lyon à Saint-Étienne (*id.*) | 14.50 | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | 3.300 000 | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | 1.101.257 |
| De Paris à Saint-Germain (*id.*) | 18,13 | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | 7.951.840 | . . . . . | 895.445 | . . . . . | 502.068 | 1.457.513 |
| De Paris à Orléans (projeté sur deux voies) | 114 | 1.300.000 | 4.824.000 | 376.000 | 2.400.020 | 706.000 | 9.599.000 | 760.000 | 19.911.000 | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | 794.000 |
| De Paris à la mer (*id.*) | 223,60 | 4.450.000 | 18,050.000 | 9 256.000 | 7.350.000 | . . . . . | 18.191.000 | compris aux chiffres précédents. | 57.297.000 | 432.000 | 480.000 | 1.725.000 | 2.800.000 | 3.437.000 |
| De Paris à la frontière belge (*id.*) | 245,225 | 1.584.000 | 7.062.500 | 9.191.580 | | . . . . . | 18.576.000 | 3.585.340 | 40.107.420 | | | | | |
| De Lyon à Marseille (*id.*) | 351,40 | 3.581 000 | 5.054.300 | 3.239.600 | 9.677.500 | 4.739.000 | 25.846.290 | 1.042.770 | 53.181.260 | 720.000 | 96.000 | 2.025.000 | 2.000.000 | 4.841.000 |
| *Chemins de fer terminés aux États-Unis.* (Extraits de l'ouvrage de M. le major Poussin.) | | | | | | | | | | | | | | |
| D'Amboy à Camden (à deux voies) | 98,168 | 613,698 | 5.937.717 | | | | | | 6.551.415 | 220.411 | | | | 220.411 |
| De Newcastle à Frenchstown (*id.*) | 26,073 | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | 2,333.738 | | | | | |
| De Columbia (*id.*) | 131,320 | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | 17.365.658 | | | | | |
| Du Portage (*id.*) | 59,000 | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | 12.000.000 | | | | | |
| De Baltimore à Harpenferry (*id.*) | 132,000 | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | 13 200 000 | | | | | |
| D'Albany à Schenectady (*id.*) | 25.62 | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | 7.595.842 | | | | | |
| De Boston à Worcester (à une voie) | 69,603 | 114,665 | 2.077.060 | . . . . . | 23.441 | . . . . . | 2,270.310 | 1.087.400 | 4.593.876 | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | 189.760 |
| D'Harlaem (à une voie) | 12,000 | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | 1.860.000 | | | | | |
| *Moyennes.* | | | | | | | | | | | | | | |
| Ligne de l'Atlantique (à double voie) | 1 | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | 145.000 | | | | | |
| *Id.* (à simple voie) | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | 38,000 | | | | | |
| Ligne de l'Atlantique à l'ouest (à double voie, sur dés en pierre) | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | 170.250 | | | | | |
| *Id.* (à double voie sur bois) | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | 141.000 | | | | | |
| *Id.* (à simple voie sur bois) | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | 69 000 | | | | | |

*Dépenses annuelles approximativement constatées ou prévues.*

| INDICATION des chemins. | CIRCULATION MOYENNE annuelle en | | DÉPENSES DU CHEMIN par kilomètre. | | | DÉPENSES TOTALES POUR LES TRANSPORTS. | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | voyageurs. | marchandises. | constructions additionnelles et réparations. | Pour frais d'administration. | Dépenses totales. | Réparations et renouvellements de : waggons. | diligences. | machines locomotives. | objets divers tels que machines stationnaires. | pour camionnage des marchandises. | Combustible. | Chauffeurs et mécaniciens | Graissage. | Frais de conduite, surveillance et administration. |
| De Liverpool à Manchester (1) . . . . . | 1.400.000 | tonneaux. 244.000 | fr. 8.027 | fr. 1.330 | fr. 9.357 | fr. 93.830 | fr. 78.770 | fr. 423.000 | fr. 317.800 | fr. 253,000 | fr. 171,000 | fr. 46.400 | fr. 59.000 | fr. 308.000 |
| Chemin de Darlington . . . . . . . | • | 558.400 | • | • | 5,734 | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| De Bruxelles à Anvers. . . . . . . . | 1.100.000 | • | • | • | 3.000 | 0f,0135 par voyageur et par kilomètre pour les frais de transport de toute espèce. | | | | | | | | |
| De Paris à Saint-Germain (2). . . . | 1.435.400 | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| De Paris à la frontière belge (chemin projeté). . . . . | kilom. 165 000 000 parcourus par voyageurs. . | kilom. 30.000.000 et parcourus par marchandises . . . . | • | • | 3.000 | x—x | x—x | compris dans les frais de conduite. | x—x | x—x | 0k,33 de coke par tonneau et par kilomètre, 0k,10 de coke par voyageur et par kil. | 0f,0260 par tonneau et par kilomètre, 0f,015 par voyageur et par kilom. | 0f,0035 par tonneau et par kilomètre, 0f,0009 par voyageur et par kilom. | 0f,006 par tonneau et par kilomètre, 0f,003 par voyageur et par kil. |
| De Lyon à Marseille (chemin projeté). . | voyages. 70.000 | tonn. 213.140 | • | • | 6.000 | 240.000 | 36,000 | réunie à la dépense des chauffeurs. | 80,000 | x—x | 0k,32 de coke par tonneau et par kilomètre, 0k,08 de coke par voyageur et par kil. | 0f,02548 par tonneau et par kilomètre, 0f,01184 par voyag. et par kil. | 35.276 fr. | 336.654 fr., ou un dixième des frais d'exploitation. |

(1) M. Guyonneau de Pambour a trouvé par tonneau et par kilomètre pour l'entretien du chemin, 1centim.,084; et pour le transport, 10c,81 par tonneau brut, sur 1 kilomètre de niveau, à la vitesse de 27 kilomètres par heure.

(2) Les dépenses de toute espèce, tant pour le chemin que pour les transports, ont été en 127 jours et par kilomètre, de 15.480 fr.

*Nota.* M. le major Poussin, dans le résumé de son ouvrage sur les chemins de fer américains, évalue comme suit les frais d'entretien et de transport :

Travaux d'art.
- Réparations des terrassements dans les cinq premières années après l'achèvement. . 7 pour 100 des dépenses premières.
- Après les cinq premières années . . . . . [illegible] pour 100.
- *Id.* des maçonneries . . . . . . . . . . [illegible] pour 100.
- Entretien des voies. . . . . . . . . . . 2 ½ pour 100.

Matériel de transport.
- Entretien annuel et renouvellement d'une locomotive pour le transport des marchandises, avec vitesse de 13 kilomètres à l'heure. . . . . . 40 pour 100 des dépenses premières.
- *Id.* d'une locomotive employée au transport des voyageurs, avec une vitesse de 24 à 32 kilomètres à l'heure. . . . . . . . . . . . . 60 pour 100.
- Entretien des chariots de transports pour les marchandises . . . . . 80 pour 100.
- Entretien des voitures de voyageurs. . . . . . . . . . . . . . . . 50 pour 100.

Limite des frais de traction . . { 0f,05 par tonne et kilomètre pour les marchandises, avec la vitesse susdite de 13 kilomètres à l'heure. 0,015 à 0,02 ½ par voyageur et par kilomètre, avec la vitesse susdite de 24 à 32 kilomètres par heure.

*Tarif par kilomètre établi ou proposé pour des chemins de fer existants ou projetés.*

| DÉSIGNATION DES CHEMINS. | PAR VOYAGEUR. | | PAR CHEVAL OU BŒUF. | | PAR TONNE DE HOUILLE. | | PAR TONNE MOYENNE DE MARCHANDISES DIVERSES. | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Pour péage | Pour transport. | Pour péage. | Pour transport. | Pour péage. | Pour transport. | Pour péage. | Pour transport. |
| De Liverpool à Manchester. | De 0f,11 à 0,14 par voiture couverte ou découverte (péage et transport compris). | | | | 0f,286 pour péage et transport. | | | |
| De Bruxelles à Anvers | 0f,027 pour péage et transport. | | | | | | | |
| De Paris à Saint-Germain. | 0f,055 par voyageur en wagon; 0f,085 par voyageur en diligence } pour péage et transport. | | | | | | | |
| De Paris à Orléans (chemin projeté). | De 0f,057 à 0f,058 pour péage et transport. | | | | 0f,12 pour péage et transport réunis. | | | |
| De Paris à la mer (*id.*). | 0,066 | 0,024 | 0,04 à 0,05 | 0,02 à 0,03 | 0,03 | 0,05 | 0,035 à 0,055 | 0,055 |
| De Paris à la frontière belge (*id.*). | 0,022 | 0,022 | | | | | 0,045 | 0,045 |
| De Lyon à Marseille (chemin projeté). A la descente, ou de Lyon à Marseille. | De 0,044 à 0,056 | De 0,022 à 0,028 | 0,06 | 0,04 | 0,05 | 0,03 | De 0,06 à 0,07 | De 0,04 à 0,05 |
| De Lyon à Marseille (chemin projeté). A la remonte, ou de Marseille à Lyon. | *id.* | *id.* | *id.* | | 0,07 | 0,05 | De 0,086 à 0,100 | De 0,054 à 0,06 |
| Chemins de fer américains. D'Harlaem | 0f,08 par kilom. | | | | | | | |
| De Trenton à Philadelphie | 0,088 | | | | | | 0f,088 | |
| D'Albany à Schenectady | 0,13 | | | | | | | |
| De Schenectady à Saratoga | 0,19 | | | | | | | |
| De Philipsbourg à la Juniata | | | | | | | 0f,065 | 0f,065 |
| Du port Clinton | | | | | | | 0f,05 pour les deux. | |
| De Baltimore à l'Ohio | 0,10 | | | | | | 0f,20 dans un sens, 0f,13 dans l'autre. | |
| De Decatur à Toscumbo | | | | | | | 0f,29 par tonne de marchandises diverses. 0f,107 par tonne de bois. 0f,143 par tonne de coton. | |

FIN DE LA DEUXIÈME PARTIE.

# TROISIÈME PARTIE.

VIADUCS ET PONTS FIXES, EN MAÇONNERIE, EN CHARPENTE ET EN MÉTAL, PONTS SUSPENDUS, PONTS MOBILES.

## RÉSUMÉ DE LA DIX-NEUVIÈME LEÇON.

DES VIADUCS, PONTS ET PONTCEAUX EN MAÇONNERIE. — DES VOUTES, PILES ET CULÉES DES PONTS. — DU CARACTÈRE D'ARCHITECTURE DE CES OUVRAGES.

On nomme *viaducs* les ouvrages d'art par lesquels une route pavée ou empierrée, ou un chemin de fer, traverse un terrain au-dessous d'elle, et particulièrement une autre route; *ponts*, les ouvrages d'art par lesquels une route ou un chemin franchit des rivières et autres cours ou réservoirs d'eau. Lorsque la distance des rives est au-dessous de 4 à 3 mètres, les ponts prennent le nom de *pontceaux*.

Les viaducs et ponts peuvent être formés d'une ou plusieurs arches successives d'une largeur plus ou moins considérable, et être construits en maçonnerie, en bois, en métal, ou dans des systèmes mixtes.

Le *Traité sur la construction des ponts*, de Gauthey, donne la description des principaux viaducs et ponts anciens et modernes.

Viaducs en maçonnerie.

La longueur d'un viaduc dépend du vide à franchir, et sa largeur de la circulation qu'on veut y obtenir. On a dit au chapitre relatif aux chemins de fer, quelle devait être cette largeur pour ce genre de communications. Pour les viaducs des routes ordinaires, on peut se borner, suivant leur longueur et la plus ou moins grande fréquentation de la route, à réserver: 1° le passage d'une seule voiture avec un ou deux trottoirs pour les piétons, chacun de $0^m,70$ de largeur minimum en dedans des parapets; 2° le passage pour deux voitures avec un ou deux trottoirs de 1 mètre de largeur minimum.

Un viaduc est ordinairement rectiligne dans sa longueur; toutefois, pour

éviter des déviations de routes, particulièrement dans les chemins en fer, ces viaducs peuvent être disposés en plan suivant un axe curviligne, qui est fréquemment circulaire dans la pratique. Mais il y aura à tenir compte de la complication qui en résultera dans l'appareil des voûtes, soit qu'on les exécute en demi-troncs de cône ou en conoïdes.

L'ouverture, le nombre et l'espèce des arches à employer, dépendent: de la différence de niveau entre le sol de la route supérieure et celui des terrains inférieurs; de la hauteur des voitures chargées qui passeront sous les arches; du nombre de ces voitures qui doivent simultanément traverser les arches; du plus ou moins de facilité que présentent les localités pour l'assiette des piédroits; enfin des ressources du pays en matériaux.

L'épaisseur des piédroits dépendra de leurs fonctions. On leur fera souvent remplir l'office de culées dans les lieux très-fréquentés, afin d'éprouver le moins d'interruptions que possible dans les communications, en cas d'avaries dans l'une des arches; ou bien l'on aura recours aux voûtes qui exercent la moindre poussée, telles que le plein-cintre et l'ogive.

Cette dernière forme sera assez bien appropriée au cas où un chemin de fer, avec machines locomotives à cheminée, passerait sous les arches du viaduc.

Si la chaussée du viaduc doit être en une seule pente, ou formée de plusieurs pentes, on sera forcé assez souvent de placer les sommets de ces arches suivant des lignes parallèles à ces pentes, et de modifier en conséquence, ou leur largeur, ou leur montée, ou leur forme. Figures 171 des planches.

Si le viaduc est d'une grande hauteur au-dessus du sol de ses fondations, on pourra le composer de plusieurs étages de voûtes, au lieu de n'en avoir qu'un seul. Figures 172 des planches.

Dans le cas d'un viaduc destiné à faire passer un chemin de fer pardessus un terrain ou une route inférieure, les *zônes* sur lesquelles les transports de ce chemin s'effectueront, sont bien déterminées, et il est possible alors de réduire la dépense de l'ouvrage d'art. En effet, au lieu de former chaque arche du viaduc d'une seule voûte s'étendant d'une tête à l'autre, on peut la composer:

1° Dans les piédroits, soit de *pilastres* isolés, soit de pilastres liés l'un à l'autre par des petites voûtes; Figures 173 des planches.

2° Dans la voûte même, avec de simples arceaux correspondant à ces pilastres, et à la direction des lignes des rails;

3° En réduisant les parapets de rive à deux simples balustrades en fer ou même en bois.

D'autres élégissements peuvent aussi avoir lieu dans les reins de ces arceaux élémentaires de la voûte de chaque arche.

Il faut considérer, en effet, dans ce genre de viaducs; que la charge temporaire est limitée au poids de la plus forte diligence ou machine locomotive; et qu'en exagérant la masse des maçonneries d'un viaduc au delà de ce qu'exige la charge temporaire, non-seulement on fait une dépense superflue, mais on complique les conditions d'une bonne fondation.

Figures 174 des planches.

Au reste, cette dernière observation est *applicable à toute espèce d'ouvrages d'art*. Les figures 174 des planches indiquent les dispositions assez ingénieuses prises en Angleterre, au chemin de Londres à Birmingham, pour le viaduc de Trent.

On voit qu'il ne saurait y avoir de règles générales sur les points sommaires qu'on vient d'indiquer; car l'économie dans les dépenses, la durée des ouvrages, doivent s'y concilier avec une foule d'autres conditions.

Fondations des viaducs.

Les fondations devront être établies d'après les principes généraux exposés plus haut. On fera remarquer seulement que dans les viaducs, on peut opposer aux poussées horizontales, obliques ou parallèles au plan des fondations des piédroits, des *plans d'étrésillonnage en charpente*, des radiers généraux en maçonnerie plate ou en voûte renversée, enfin des radiers en béton, qui rendent solidaires l'une de l'autre les diverses fondations isolées des piles et culées, lorsque toutefois elles ne seront pas séparées par des intervalles trop considérables.

Les plans d'étrésillonnage devront avoir une force telle : qu'ils résistent à la compression exercée sur eux par les poussées extrêmes. Les pièces élémentaires, qui n'auraient d'ailleurs besoin que d'être dégrossies, seraient dirigées en conséquence dans le sens de ces poussées; mais elles seraient croisées à angles droits par des cours équidistants de ventrières chevillés avec elles, et diagonalement par d'autres cours de mêmes pièces.

Figures 175 des planches.

Si les longueurs des bois dont on disposera sont insuffisantes pour l'intervalle d'un piédroit à l'autre, on les *entera*, en ayant soin de croiser les joints et de placer les cours des ventrières en correspondance avec ces joints *d'écart*, ainsi qu'il est indiqué dans les figures 175 des planches.

Figures 176 des planches.

On peut encore recourir à une autre combinaison indiquée dans les figures 176 des planches.

Si les bois de l'étrésillonnage du radier ont une pesanteur spécifique moindre que celle de l'eau, il faudra en recharger le dessus par une couche de libages qui compense la différence.

Les radiers en maçonnerie, à *voûte renversée*, conviennent particulièrement aux terrains vaseux ou marécageux, où la charge des divers piédroits tendrait à produire des gonflements dans l'intervalle qui les sépare deux à deux. Mais ces radiers, qui ne peuvent avoir généralement qu'une flèche au maximum de $\frac{1}{6}$, exigent, pour être efficaces, des matériaux d'un fort échantillon et d'un prix élevé. On leur préférera des massifs de béton, d'une épaisseur même de $1^m,50$ à $2^m,50$, toutes les fois que ces massifs auront le temps de durcir avant d'être soumis aux efforts permanents des poussées latérales sur les fondations des piédroits. Figures 177 des planches.

Des considérations d'économie déterminent même quelquefois à se borner à remplacer le mauvais terrain entre les fondations des piédroits par une couche épaisse de blocaille et d'enrochements.

Les raccordements d'un viaduc avec les abords de la voie de transport à laquelle il appartient, s'effectuent par divers moyens et suivant les divers cas qui peuvent se présenter. Raccordements des viaducs avec les zônes attenantes de routes.

Ainsi, un viaduc peut être placé à la rencontre :

1° De deux vallées ou tranchées, dont les fonds soient à des niveaux différents; Figures 178 des planches.

2° D'une tranchée supérieure avec un remblai inférieur;

3° De deux remblais étagés l'un au-dessus de l'autre;

4° D'une levée en remblais passant au-dessus d'une tranchée, ce qui est le cas le plus ordinaire.

Le viaduc, dans ces diverses positions, peut aussi avoir la même largeur de voie que la route ou le chemin de fer auquel il appartient, ou bien avoir une largeur moindre par des motifs d'économie.

Enfin, dans le 4° cas indiqué ci-dessus, le viaduc peut ou s'élever jusques à la surface de la voie de communication qu'il doit prolonger, ou rester au-dessous de cette surface, de manière que les remblais de la levée se continuent par-dessus.

Dans les positions nos 1 et 2 ci-dessus, si le viaduc a la même largeur que le chemin correspondant, le raccordement s'opère en prolongeant simplement les deux têtes de l'ouvrage jusqu'à la rencontre des talus des tranchées. Ces prolongements servent alors à la fois de contre-forts aux piédroits ou culées des arches extrêmes. Figures 179 des planches.

Dans les positions nos 3 et 4, si le viaduc reste sous les remblais de la levée supérieure, on met ses deux têtes tantôt dans les plans mêmes des talus des remblais, tantôt dans deux plans vertieaux. Le premier mode donne lieu à quelques difficultés de l'appareil en biais, et expose les têtes du Figures 180 des planches.

Figures 181 des planches.

viaduc à toutes les dégradations déjà signalées dans les revêtements en talus.

Le second mode conduit aux diverses solutions indiquées figures 181 des planches. Dans la solution (C), on s'était autrefois beaucoup trop préoccupé de la recherche de l'angle le plus convenable à l'évasement en plan des pans coupés, dénommés plus particulièrement *murs en aile* (lorsqu'ils sont en talus dans le sens vertical). L'on était arrivé à poser en règle générale, que la trace horizontale du pan coupé en *mur en aile* devait faire un angle de 22° ½ avec une parallèle à l'axe longitudinal des arches extrêmes d'un viaduc ou pont.

Murs en *aile*.

Il est inutile de dire, d'ailleurs, que les plus simples notions de coupe des pierres exigent : que les lits horizontaux de l'appareil des têtes du viaduc se prolongent dans les murs en retour, pans coupés ou en *ailes*, sauf à se dévier, sur 0m,16 à 0m,20 de hauteur, normalement aux surfaces apparentes de rencontre de ces murs avec les talus inclinés.

Figures 182 des planches.

Dans les mêmes positions, nos 3 et 4, si le viaduc s'élève jusques à la surface de la voie en remblai et qu'il ait la même largeur qu'elle, on pourra encore recourir aux solutions qu'on vient d'indiquer. Mais souvent alors on dispose en *gradins ou escaliers* les couronnements rampants des murs droits, pans coupés et murs en ailes, pour les communications entre le bas et le haut du viaduc.

Figures 183, 184, 185 des planches

Enfin si le viaduc, étant toujours élevé jusques au niveau de la levée en remblais, présente un débouché moindre que cette dernière, on raccorde les deux débouchés différents par des surfaces, en pans coupés, droites ou curvilignes; ces surfaces elles-mêmes sont formées soit par des murs de soutènement, soit par des talus simples ou revêtus de perrés. Les exemples donnés dans les figures 183, 184 et 185 suffisent pour éclaircir la question.

*Ponts et ponteeaux en maçonnerie.*

Ponteeaux en maçonnerie.

Les ponteeaux sont placés ordinairement aux rencontres d'une route avec de faibles cours d'eau non flottables ni navigables, ou avec des ravins dans des terrains accidentés. Leur axe doit toujours être suivant le fil de l'eau, sauf à les placer en biais par rapport à l'axe de la route.

Leur débouché est en raison du volume d'eau maximum qu'ils ont à évacuer. Si le ponteeau est établi sur un cours d'eau permanent, on lui donne une largeur de débouché équivalente au maximum du débouché de celle des sections en amont, où il n'y a point de hauts fonds, d'alluvions ni de corrosions. A défaut de ce point de départ, il faut étudier le cours

d'eau dans les étiages et les crues, connaître les volumes d'eau et vitesses à ces deux limites supérieure et inférieure, la hauteur, l'étendue et la durée des inondations en amont, s'il y en a; et établir la section du ponceau d'après ces données et la formule de M. de Prony,

$$u = -0,07 + \sqrt{0,0051 + 3233RI} :$$

où $u$ : est la vitesse moyenne en mètres par seconde; I la pente par mètre; R le rayon moyen ou la surface du débouché en mètres carrés, divisées par le périmètre mouillé, exprimé en mètres.

Si le ponceau devait être établi près du confluent du cours d'eau avec une rivière considérable, dont les crues pourraient refluer par cet ouvrage, ses dimensions n'en devraient pas moins être réglées uniquement sur le volume des eaux du ruisseau.

Si le ponceau est établi sur un ravin; il faut rechercher, par des observations multipliées, quel est le maximum de volume d'eau affluente dans l'unité de temps, à la suite des orages ou des fontes de neiges, et régler le débouché de manière que ce volume s'écoule sans déterminer d'inondations dans les terrains en amont, ni de cascades sous le ponceau, qui, affouillant les fondations, entraîneraient la ruine de l'ouvrage.

S'il y a déjà des ponceaux construits dans les environs, et qui suffisent après les orages et fontes de neiges, on pourra établir le débouché des nouveaux ouvrages de ce genre, d'après les surfaces respectives des bassins qui versent leurs eaux, et en tenant compte des pentes plus ou moins déclives du sol. Dans les pays plats, où les reliefs de terrains n'ont que 15 à 20 mètres de hauteur, on est dans l'usage de donner de $0^m,45$ à $0^m,50$ de largeur pour 1000 hectares; et cette largeur est portée jusqu'à 2 mètres pour 1000 hectares si les accidents de terrains sont plus prononcés. Il est évident d'ailleurs que si le ponceau était placé au point central d'affluence des eaux arrivant en même temps dans tous les sens, il aurait besoin de plus de débouché que s'il se trouvait à des distances très-inégales des principaux versants. Ponceaux sur ravins.

Lorsqu'un ponceau doit servir à l'écoulement des eaux arrivant dans une vallée, où le terrain est peu solide, il sera convenable de le placer plus haut, sur le flanc d'un coteau, en creusant de nouveaux lits aux eaux à l'amont et à l'aval.

Enfin, il est, dans les pays très-plats et notamment en Alsace, des

chemins qui *forment levées*, et qui retiendraient les eaux des inondations sur celle de leurs rives qui est à l'amont, s'ils n'étaient percés par un grand nombre de ponceaux établis dans les points les plus bas du terrain. Ces ponceaux sont à sec pendant une grande partie de l'année. Leurs nombre, dimensions, et la hauteur de leur radier, doivent être réglés d'après l'étendue et le niveau des terrains inondés, et le temps minimum d'écoulement pour que l'agriculture n'éprouve pas de pertes considérables.

Voûtes des arches des ponceaux

De toutes les courbes qui peuvent être employées pour la construction des voûtes des ponts et ponceaux, le demi-cercle, appelé *plein-cintre*, est la plus belle et la plus pure.

Les anciens l'ont presque toujours adoptée.

Son usage ne convient cependant pas à toutes les circonstances de localités.

Elle élève quelquefois trop les ponts, et rend leur abord difficile.

Le plein-cintre, donnant beaucoup de largeur aux reins et aux tympans des voûtes, s'oppose à l'écoulement des eaux, puisqu'à mesure qu'elles s'élèvent elles trouvent un moindre débouché. On n'y remédie qu'incomplétement par des évidements dans les reins, parce que les contractions des veines fluides y sont plus fortes que dans un débouché principal unique.

Ces considérations déterminent à borner l'emploi des pleins-cintres à certaines localités, et en général aux ponts d'une petite ouverture.

La voûte en plate-bande est celle qui satisferait le mieux aux conditions du plus grand débouché; mais on en fait rarement usage pour les ponts, à cause des difficultés de construction et de réparations; elle n'est pas d'ailleurs applicable aux grandes ouvertures, à cause de la grande énergie des poussées horizontales qu'elle exerce.

Après la plate-bande, c'est la voûte en arc de cercle qui satisfait le mieux à la condition du plus grand débouché.

Cette dernière voûte a aussi l'inconvénient d'exercer des poussées horizontales assez considérables.

On lui préfère ordinairement la voûte, dont le cintre de face est une ellipse surbaissée ou anse de panier : cette courbe tient le milieu entre celle en arc de cercle et le plein-cintre.

Pour diminuer les contractions d'eau aux têtes des arches, on a recours quelquefois à l'expédient suivant : les têtes des arches présentent des arcs de cercle d'une faible montée qui se raccordent avec les voûtes en plein-

cintre, elliptiques, et autres, du reste de la longueur des arches, par des surfaces gauches, qu'on nomme vulgairement *arrière-voussoirs* et *cornes de vache*.

Si la vitesse des eaux aux abords du ponteau est grande, par exemple de plus de 2 mèt. par seconde, il sera prudent de faire tomber les eaux à l'amont par un puits en maçonnerie; de parementer de la même manière le radier de l'ouvrage, et d'en défendre les têtes à l'aide de pierres appareillées en plates-bandes, et même à l'aide d'*arrière-radiers* en fascinages, ou en enrochements. Figures 186 des planches.

Le radier d'un ponteau est souvent établi en voûte renversée, dont la flèche de courbure est telle que, retranchée du rayon, elle laisse pour reste une fois et demie ou deux fois l'ouverture de l'arche.

Tout ce qu'on a dit précédemment sur les raccordements des viaducs avec leurs abords s'applique d'ailleurs aux ponteaux.

Les figures 187 des planches donnent les tracés et dessins relatifs à un ponteau placé sur des remblais. Figures 187 des planches.

Les figures 188 et 189 sont relatives à un ponteau dont le dessus arrase la plate-forme des levées aux abords. Figures 188 et 189 des planches.

Enfin les figures 190 et 191 indiquent divers modes d'épauler les terres d'une levée aux abords d'un ponteau disposé comme dans les figures 188. Figures 190 et 191 des planches.

Lorsqu'il s'agit de la formation d'un grand projet de pont, l'Ingénieur doit commencer par lever un plan exact des lieux, sur lequel soient indiqués d'une manière précise; la largeur du cours d'eau; les accidents du terrain; les bancs d'alluvions que les basses eaux découvrent; les îles; enfin la direction des chemins ou des rues qui doivent aboutir au pont. Il est non-seulement essentiel de bien connaître les abords de son emplacement; mais il faut encore, au moyen de nivellements, suivant la ligne du projet en amont et en aval, établir le profil du lit et des rives; mesurer avec soin le volume des eaux en diverses circonstances, rattacher avec exactitude au nivellement, la hauteur de l'étiage ou des plus basses eaux, ainsi que celle des plus grandes crues. On doit aussi joindre à ce nivellement des sondes assez multipliées pour déterminer, dans tous les points du profil, la nature du sol et la profondeur à laquelle se trouve le terrain ferme. Enfin, on rattache tout le nivellement à un point invariable, et qui doit ultérieurement servir de *repère* pour les opérations relatives à la construction. Ponts en maçonnerie.

L'axe du projet doit être placé, autant que possible, perpendiculairement au cours de la rivière, afin que les faces longitudinales des piles et culées

soient parallèles au fil de l'eau ; et lorsque l'établissement général du projet s'y oppose, il vaut mieux exécuter le pont avec têtes biaises que d'établir des piles formant angle avec le courant; parce qu'alors exposées elles-mêmes aux affouillements, elles seraient de plus une cause permanente d'entraves ou d'accidents pour la navigation.

Ponts avec axe curviligne.

Figures 192 des planches.

Figures 193 des planches

On a quelquefois, pour raccorder des portions de route qui sur chaque rive n'étaient pas dans le prolongement l'une de l'autre, exécuté des ponts suivant un axe curviligne en plan, auquel le fil de l'eau du thalweg était normal; mais cette disposition a en grande partie les inconvénients qu'on vient d'énumérer, et de plus celui de créer beaucoup de complications dans l'appareil des voûtes. On trouvera dans le tome 1^er^ du *Traité de construction des ponts* de Gauthey, la description d'un pont de *carrefour* très-compliqué d'appareil, placé à la jonction des canaux du Midi et de Narbonne.

Nombre, ouverture et espèce des arches des ponts en maçonnerie.

Les masses principales et leur position étant ainsi arrêtées, il reste à déterminer le nombre, l'ouverture et l'espèce des arches dont le pont doit être composé; les fonctions des piédroits ou ce qui est la même chose; il faut fixer la section du débouché, en tenant compte non-seulement du volume des eaux à évacuer, mais des besoins du flottage, de ceux de la navigation, des dimensions des bateaux, de leur manœuvre, etc.

La solution de cette question, et indépendamment des sujétions locales, des considérations d'économie, de durée, se rattache principalement au volume des eaux auquel le pont doit donner passage à l'époque des plus grandes crues. Car il s'agit en effet d'y proportionner le débouché total des ouvertures, de manière que la vitesse du courant qui s'établirait sous le pont ne fut pas trop considérable, n'exposât pas les piles à être affouillées, ne rendit pas dangereux le passage des bateaux; de manière aussi que le remou ou gonflement d'eau en amont ne pût pas augmenter l'étendue et la durée des inondations, enfin que la cascade d'eau *en aval* n'en corrodât les rives.

Les expériences de Dubuat, qui ont fait faire des progrès à la science des eaux courantes, et surtout les recherches ultérieures de M. de Prony sur la concordance avec l'expérience des formules qu'il a rectifiées, ont appris que la vitesse moyenne, élément dont on a besoin pour calculer le volume des eaux qui s'écoulent, était à très-peu de chose près égale aux de la vitesse à la surface.

Feu M. Navier a démontré depuis (tome 6 des Mémoires de l'académie

des sciences) que, lorsque les eaux se meuvent dans un lit *rectiligne suivant* des lignes *droites parallèles à l'axe* du lit, la vitesse moyenne et la vitesse la plus grande dans le thalweg à la surface, tendent à devenir égales à mesure que les dimensions du lit deviennent plus petites, et *quelle que soit la figure de la section transversale.* Le rapport des deux vitesses est d'ailleurs indépendant de leur valeur absolue. Si la profondeur verticale de l'eau est très-petite et la largeur très-grande, la vitesse moyenne sera les 0,64 de la vitesse maximum. Si les deux dimensions sont toutes deux très-grandes, le rapport devient 0,41.

Toutefois, M. Navier reconnaissait lui-même que l'hypothèse ci-dessus du mouvement linéaire se réalisait rarement dans le lit des fleuves.

On pourrait, au moyen de ces données, si elles étaient les seules, obtenir assez exactement la solution du problème du débouché. Mais la considération du plus ou moins de ténacité du terrain qui forme le lit de la rivière, et l'influence des remous en amont entrent pour beaucoup dans cette solution, et il faut y avoir égard, afin de déterminer la vitesse à laquelle on doit s'astreindre.

On peut apprécier, dans le tome 1[er] du *Traité sur la construction des ponts* de Gauthey, et dans les articles insérés par MM. Vicat, de Prony, Vauthier, Coriolis et d'Aubuisson, dans les *Annales des ponts et chaussées* de 1835, 1836, 1837, l'importance de ces remous et les moyens d'en calculer la portée relativement, au niveau naturel des eaux, et aux rives en amont.

Si le pont devait être construit sur un sol de rocher; il n'y aurait plus d'inconvénients, sous le rapport des affouillements, à adopter un débouché moindre que celui que présente la section moyenne de la rivière; mais si le lit est composé de matières susceptibles d'être enlevées ou corrodées par le courant, il devient indispensable de donner un débouché à peu près égal à cette section. Que si la rivière était très-encaissée et à rives résistantes, il n'y aurait pas non plus à se préoccuper des effets du remou à l'amont. Mais il resterait toujours des entraves et des dangers très-grands pour la navigation toutes les fois que la rivière serait ou devrait être rendue navigable.

Le parti qui paraît le plus convenable dans toutes les circonstances, c'est d'examiner le débouché des ponts, s'il en existe sur la même rivière, au-dessus de celui qu'il s'agit de construire; de rechercher la vitesse qui résulte de ce débouché, et les effets de cette vitesse sur le fond; d'observer si elle n'occasionne pas d'affouillements auxquels l'art soit obligé de porter remède; enfin, si ce fond est de même nature que celui qui doit recevoir le

nouveau pont, il n'y a pas de doute qu'on ne puisse adopter le même débouché, en le modifiant toutefois en raison des affluents qui peuvent avoir eu lieu depuis le pont pris comme *Type*, et de manière que la vitesse moyenne, sous le nouveau pont, soit la même, dans les mêmes circonstances, que celle qui a lieu sous ce pont type.

La largeur du débouché étant déterminée, quoique les épaisseurs des piles n'entrent pas dans cette largeur, comme leur masse est toujours un obstacle au courant, il est important de n'en faire que le moins possible.

Dans les contrées où les eaux des rivières charrient des glaçons et éprouvent des débâcles subites et simultanées avec des crues d'eau, le grand nombre de piles peut déterminer la destruction du pont, *quand même ses fondations seraient à l'abri d'accidents*; parce que l'accumulation de ces matières, entraînées avec une grande vitesse, serait une force vive énorme qui agirait sur le pont dans le sens où il offre le moins de résistance.

Mais si de plus, les fondations sont susceptibles d'être attaquées par des corrosions, le danger pour le pont serait beaucoup plus grand encore; parce que les glaçons ou débris flottants amoncelés en amont des piles formeraient une sorte de barrage au-dessous duquel les eaux s'écouleraient avec une augmentation de vitesse d'autant plus marquée, que les contractions de débouché seraient plus nombreuses dans la longueur du pont. Aussi les ponts des grands fleuves d'Allemagne ou des États-Unis d'Amérique ont généralement un petit nombre d'arches de grande ouverture.

Le principe précédent a cependant pour limite, d'une part, le maximum d'ouverture qu'il est possible d'adopter avec les matériaux *disponibles*, et de l'autre, la hauteur de la montée que les localités permettent de donner. La montée la plus surbaissée ne peut être généralement pour de très-grandes voûtes, au-dessous du $\frac{1}{4}$ de l'ouverture. D'ailleurs on tient ordinairement le sommet de la voûte au-dessus des plus hautes eaux, de 1 à 2 mètres.

Des voûtes des ponts en maçonnerie

Quand la distance du dessus du pont au plan des fondations est très-considérable, on peut du reste, comme il a été dit pour les viaducs, et comme il a été fait au pont du Gard, établir en hauteur plusieurs étages de voûtes.

Comme il est avantageux d'avoir un vide placé au milieu du cours de la rivière, où se trouve ordinairement le *thalweg*, ou ligne de la plus grande profondeur et de la plus grande vitesse des eaux, il en résulte que si le

pont a plusieurs arches, leur nombre à partir de l'unité devra croître généralement de deux.

L'adoption du système des voûtes en portion de berceau supprime beaucoup des difficultés qui résultent ordinairement de la multiplicité des conditions locales à remplir.

Les voûtes en berceau, formées d'un seul arc de cercle, peuvent avoir leur naissance à la hauteur des plus grandes eaux, et même un peu au-dessus, circonstance favorable à l'écoulement des crues; ce genre de construction procure d'ailleurs la facilité d'établir pour la navigation un chemin de halage sous l'une des arches extrêmes. Les figures 194, relatives au nouveau pont d'Iéna, en donnent l'indication. Figures 194 des planches.

Ces avantages semblent devoir déterminer, toutes choses égales d'ailleurs, l'adoption de ce système de voûtes.

Au pont de Neuilly, pour faciliter l'écoulement des eaux et élégir à l'œil les masses de maçonneries, Peyronnet avait évasé les entrées et sorties des têtes, en raccordant les anses de panier du corps des voûtes, par des surfaces gauches, avec des arcs de cercle tracés sur les têtes. Cette combinaison déjà mentionnée plus haut a été suivie également dans les ponts plus récents de Bordeaux et de Libourne. Figures 195 des planches.

Dans quelques ponts on a évidé les reins ou tympans des voûtes par des ouvertures supplémentaires de diverses formes destinées à augmenter le débouché pour l'écoulement des eaux des crues, et à diminuer le poids des maçonneries sur les fondations. Figures 196 des planches.

On chercherait au reste en vain; à remédier à l'insuffisance du débouché du thalweg; en reculant les culées dans les terres pour augmenter la section de la rivière; cet élargissement se trouvant hors du courant, les eaux y seraient stagnantes; les alluvions s'y déposeraient et rétabliraient le lit dans son état de largeur primitive; et la vitesse, ainsi que les effets sur le fond, seraient bientôt les mêmes.

Si les culées tiennent à des quais déjà construits, leur nu devra être généralement établi sur l'alignement de ces quais.

Cependant, si le lit de la rivière avait entre les quais une largeur superflue, on pourrait, avec avantage, faire saillir les culées ainsi qu'il a été fait dans une foule de ponts anciens et modernes.

Cette disposition de culées en saillie facilite les abords du pont, et est d'un bon effet.

D'ailleurs, un débouché trop considérable est un inconvénient : il oc-

casionne, lors des basses eaux, des attérissements qui s'élèvent successivement et rendent quelquefois la *section insuffisante lors des crues*.

Dans les ponts sur rivières navigables, il faut de plus pourvoir aux besoins du halage. Tantôt on établit les chemins de halage en dedans des arches extrêmes et en les adossant aux culées, ainsi qu'il a été fait aux ponts de la Concorde, de Saint-Maxence et d'Iéna. Tantôt on ménage des arches dites de halage dans les massifs des culées, comme dans les ponts de Neuilly et de Sèvres. Le pont de Chester, en Angleterre, représenté dans les fig. 197 des planches, est dans le même système; on peut y remarquer des artifices ingénieux d'appareil pour contre-balancer l'effet de la poussée de la voûte.

Figures 197 des planches

Dans quelques cas, et particulièrement pour les ponts de peu de relief sur les terrains d'alentour, situés sur des rivières de peu de vitesse et d'un régime très-régulier, on n'établit ni chemins de halage sous les arches, ni arches marinières dans les culées; et le halage est interrompu pendant la traversée du pont.

Dans tous les cas, il est utile de garnir de lignes d'arganaux les parements des piédroits des arches extrêmes et des arches intermédiaires pratiquées habituellement par les bateaux.

Largeur d'un pont en maçonnerie entre ses deux têtes.

La largeur d'un pont entre ses têtes dépend de l'importance de la route à laquelle il appartient.

On a des exemples de diverses largeurs depuis 7 mètres jusqu'à 16 mètres; le nouveau pont de Bordeaux a 14 mètres; dans les grandes villes on leur assigne des largeurs plus considérables encore.

Ainsi le Pont-Neuf à Paris a 22 mètres de largeur entre les parapets. Le tome 1[er] du *Traité de la construction des ponts* de Gauthey indique les dimensions principales des ponts anciens et modernes tant en France qu'à l'étranger.

En général, les ponts sont moins larges que les routes : on rachète cette largeur à leurs extrémités, comme il a été dit pour les viaducs, par des élargissements brusques ou par des évasements en pans coupés rectilignes, ou par des demi-tours creux ou ronds. Ces pans coupés sont utiles pour faciliter les abords.

Figures 183, 184, 185 des planches

Lorsque les localités se refusent à ces pans coupés extérieurs à la largeur du pont, on se les procure, soit par le moyen employé au pont Royal à Paris (figures 198 des planches), soit en établissant ces raccordements sur des pendentifs dans les angles, et même quelquefois en les posant en

Figures 198 des planches.

encorbellement sur des voûtes spéciales ; mais ce dernier moyen entraine plusieurs inconvénients relativement à l'appareil.

On a beaucoup varié sur la manière de considérer les fonctions des piles. C'est cependant de cette considération que résulte l'épaisseur qu'elles exigent. Dimensions des piles des ponts en maçonnerie.

Les uns ont voulu qu'elles formassent culée pour chaque ouverture, en ajoutant aux poids des voûtes les charges mobiles évaluées habituellement au maximum à 200 kilogrammes par mètre quarré; d'autres personnes, parmi lesquelles on compte des Ingénieurs du premier mérite, ont pensé que les piles ne devaient satisfaire qu'à deux conditions : 1° de supporter le poids des charges fixes et mobiles; 2° de résister à la différence des poussées de deux arches voisines, au moment où l'une d'elles porte seule la charge mobile.

Dans le premier cas, les piles doivent avoir pour épaisseur celles des culées elles-mêmes.

Dans le deuxième cas, l'épaisseur des piles pourrait être seulement le double de la hauteur de clef de l'une des demi-voûtes, voussoir qui est le plus comprimé de tous. Mais dans quelques-uns des grands ponts construits récemment, et où les piles ne forment pas culée, l'on a donné le quart, et même quelquefois le tiers en sus des résultats auquel conduisait la règle empirique ci-dessus.

L'admission du deuxième système procure une grande économie de matériaux, et l'on peut même dire qu'elle ajoute généralement à la solidité des ponts, en diminuant, par une moindre épaisseur des piles, les causes des affouillements qui occasionnent la ruine de ces ouvrages. Aussi, dans la plupart des ponts exécutés de nos jours, l'épaisseur des piles a été restreinte à 5, 4 mètres, et jusqu'à 3 mètres.

On a même, dans quelques ponts, élégi les piles par des voûtes percées dans le sens de leur longueur, notamment au pont Saint-Maxence, dû au célèbre Peyronnet, et le plus hardi des ponts surbaissés en arc de cercle. Figures 199 des planches.

Ce pont avait été coupé en 1814. Trente ans après son achèvement, l'on avait fait sauter l'arche attenante à la rive gauche. Toutefois, l'explosion avait laissé à la tête d'amont de cette arche, une zône de 2$^{m}$,50 de largeur, dont les claveaux, surtout vers la clef, avaient été fracturés et déplacés. Grâce à l'excellente construction du pont, cette opération qui devait entrainer au moins la chute *partielle* de l'arche du milieu, et par suite de l'arche de la

rive droite, n'a été suivie d'aucune altération dans cette dernière. Dans l'arche du milieu, la zône d'amont de la première pile de la rive gauche a surplombé de $0^m,0012$, la zône d'aval de $0^m,03$. La voûte de cette arche a tassé de $0^m,008$ à l'amont; de $0^m,17$ à l'aval. Les joints s'y étaient ouverts à l'intrados au sommet de la voûte, et à l'extrados contre le coussinet. La restauration du pont s'est faite, en étrésillonnant la pile surplombée, reconstruisant successivement une première zône de la voûte à la tête d'aval, une deuxième zône au milieu, enfin en démolissant la zône restée à l'amont, et la remplaçant par de la maçonnerie neuve.

L'emploi du deuxième système ci-dessus exige d'excellents matériaux d'une grande dimension, la liaison intime des voûtes avec les piédroits, la certitude d'un bon fond, et celle d'un régime bien établi dans le lit de la rivière; ce système occasionne en outre une plus grande dépense pour les cintres, parce qu'on est obligé de construire, et par conséquent de cintrer toutes les voûtes à la fois.

Figures 200 des planches

Il est encore convenable dans ce cas, de restituer aux piles, par des retraites au-dessous de l'étiage, une partie de l'épaisseur qu'elles auraient eue si on les eût considérées comme culées. Quelquefois même, on a fait épaissir progressivement les piles depuis les naissances des voûtes jusqu'à leur base, soit par l'inclinaison rectiligne en talus des parements, soit par un renflement curviligne.

Lorsqu'il s'agit de construire un grand pont sur une rivière sujette à des crues fréquentes, *dont le fond est mobile* et le *régime variable*, il faut évidemment renoncer au système des piles minces, puisque la chute de l'une d'elles entraînerait celle de tout le pont.

On doit alors construire des piles formant culées; cependant, pour diminuer l'inconvénient du rétrécissement du lit, et par conséquent d'un moindre débouché, on peut n'établir ces *piles culées* que de deux, ou même de trois en trois arches.

Ce moyen, indiqué par des Ingénieurs célèbres, partage le pont total en plusieurs parties, et concilie les avantages propres aux deux systèmes.

Ponts éclusés en maçonnerie.

Souvent des ponts établis sur des rivières navigables, ou qui doivent être rendues navigables, sont éclusés de manière à retenir les eaux d'amont à un niveau constant. On épargne ainsi les dépenses que coûteraient les deux ouvrages isolés. Les conditions spéciales qui en dérivent sont de nature à modifier les formes, les dimensions des arches, des piles, et des radiers intermédiaires aux arches, ainsi qu'on le verra à la section relative à la navigation intérieure.

Les figures 201 des planches représentent quelques-uns de ces ouvrages. Figures 201 des planches.

Les têtes des ponts sont défendues en amont contre les chocs des corps flottants, par le prolongement du corps carré des piles. Ces défenses ont également lieu à l'aval des ponts. Avant-becs et arrière-becs des piles et culées des ponts en maçonnerie.

Ces prolongements des piles sont ce qu'on appelle les *avant* et *arrière-becs*.

Ils doivent avoir à la fois une grande résistance, et une forme telle néanmoins, qu'elle réduise au minimum : le gonflement du niveau de l'eau ; l'espèce de cascade qu'on remarque dans le trajet des arches des ponts ; et surtout les remous et tournoiements d'eau qui, dans des terrains sablonneux et mobiles, sont la cause principale des affouillements. Le tom. I[er] *du Traité de la construction des ponts* de Gauthey, chap. v, parag. 2, pl. 14, relate les expériences faites sur diverses formes d'avant-bec et d'arrière-bec. Le même sujet a été traité dans les *Annales des ponts et chaussées* ; relativement à des ponts sur la Dordogne.

Dans les ponts anciens, ces avant et arrière-becs forment ordinairement un prisme ayant pour base un triangle isocèle, quelquefois mixtiligne, composé de deux arcs de cercle, dont l'épaisseur de la pile forme la base et le rayon. Figures 202 des planches.

Ces corps saillants doivent toujours s'élever au reste jusqu'à la hauteur des grandes eaux.

On les surmonte d'une *plinthe*, terminée elle-même par un solide nommé *chaperon*, dont on a varié la forme de plusieurs manières. Dans les ponts modernes, la plus simple et la plus agréable est un demi-cône aplati ; c'est celle employée au pont de Neuilly.

Le plan triangulaire des avant-becs n'est plus d'un usage aussi fréquent ; on lui a préféré, dans des grands ponts récents, la forme demi-circulaire. Figures 203 des planches.

Quelquefois les piles prennent, dans les ponts décorés, la forme de colonnes engagées ; quelquefois on prolonge ces espèces de colonnes jusqu'à l'entablement qu'elles supportent.

Aux ponts de Black-Fryards et de Waterloo, à Londres, les piles sont surmontées d'un groupe de deux petites colonnes qui ne portent que leur entablement, et dont l'objet est d'orner la *lisse* des tympans. Figures 204 des planches.

Au reste, pour défendre les saillies des piles vers l'amont, contre le choc des glaces, des corps flottants et des bateaux de la navigation, on place quelquefois en avant un système de charpente pyramidal à base triangu-

laire, enraciné dans le fond du lit de la rivière, et qui présente au courant une arête inclinée de l'amont à l'aval.

*Caractère d'architecture des ponts en maçonnerie.*

L'architecture des ponts, principalement recommandable par les grandes masses et la hardiesse des constructions, repousse des ornements trop multipliés et qui seraient disparates.

La seule sujétion, dans leur appareil, est le raccordement des voussoirs avec les assises horizontales des reins.

Dans l'architecture ordinaire, et pour des voûtes peu considérables, on obtient quelquefois ce raccordement par un moyen qui n'est admissible que jusqu'à un certain point dans la construction des ponts. Ce moyen est ce qu'on appelle *appareil à crossettes;* c'est-à-dire qu'au lieu de placer un joint vertical au-dessus de la rencontre de chaque assise horizontale avec le joint correspondant du cintre de tête; ce joint vertical est reculé, à droite ou à gauche, d'une certaine quantité, et la portion de l'assise horizontale que ce reculement comprend, fait partie du voussoir; c'est ce qu'on nomme *crossette.*

Dans les parties supérieures des voûtes, on rejette l'appareil à crossettes, à cause des fractures qu'il occasionnerait lors du tassement inévitable des voûtes à grandes dimensions, après leur décintrement.

Les crossettes peuvent être employées sans inconvénients depuis les naissances jusqu'à une certaine hauteur. On appelle *retombée*, les voussoirs qui font ainsi partie de l'assise horizontale.

Figures 205 des planches — Les figures 205 des planches, indiquent divers autres moyens adoptés pour raccorder les voussoirs avec les assises horizontales des piles et des tympans, et pour laisser aux voûtes des arches la faculté d'opérer leur tassement, en évitant la fracture des pierres.

Le dérasement du lit supérieur de chaque voussoir, pour ces raccordements, ne peut être fait que sur place, et après l'effet du tassement.

On n'effectue les raccordements en *manière de degrés*, que lorsque les voussoirs, par leur disposition, ont acquis une longueur de coupe suffisante. Il est d'ailleurs convenable à la solidité de n'élever qu'à la moindre hauteur possible le système des retombées, afin de poser les voussoirs sur leur lit de carrière.

Le pont de Mantes présente un exemple de la difficulté de satisfaire à

toutes les conditions auxquelles on doit avoir égard pour ce raccordement des voussoirs avec les assises horizontales. Le parti qu'on a pris offre une irrégularité frappante. Figure 206 des planches.

Au nouveau pont de la place Louis XV, où les avant et arrière-becs sont formés par des colonnes engagées, ce raccordement n'a pu avoir lieu; la composition du projet s'y refusait. Les voussoirs ont obtenu la longueur de coupe qui leur était nécessaire, en se prolongeant au delà de la pénétration *apparente* : cette licence dans l'appareil, a rendu les voussoirs indépendants des assises horizontales. Figures 207 des planches.

L'appareil des voûtes en portion de berceau ne commence qu'à leur imposte. Si la base du coussinet reposait sur l'imposte, elle formerait un angle aigu, et, de plus, trois arêtes visibles existeraient à la fois à ce point. Pour éviter ce défaut, on abaisse ordinairement le plan de l'assise inférieure du coussinet, en sorte que l'origine du cintre lui soit supérieure. Tel est le parti qu'on a pris au pont de Pesme, département du Doubs. Figures 208 des planches.

Un grand pont établi de niveau est une beauté généralement reconnue par les modernes. Cette disposition permet d'ailleurs l'emploi de quelques-unes des richesses de l'architecture, qui font toujours mauvais effet lorsque les ponts ne sont pas de niveau. Si l'on compare, sous ce point de vue, les ponts de Neuilly et celui de la place Louis XV, la vérité de ce principe sera évidente.

Lorsque, par des circonstances de localités, l'on est forcé de renoncer à un pavé de niveau suivant l'axe du pont, et d'établir la voie, sur une seule pente d'une rive à l'autre, ou sur deux pentes, à partir de l'axe transversal de l'arche du milieu et en allant vers les culées, ces pentes ne doivent pas excéder $\frac{1}{24}$ de leur longueur. Alors aussi, comme pour les viaducs, on est obligé souvent soit de modifier les largeurs et montées des arches, soit de placer leurs naissances à diverses hauteurs, et de varier la forme des voûtes.

Ponts en maçonnerie couverts.

Plusieurs anciens ponts d'Italie et de France étaient couverts par des toitures comme les passages modernes des rues, et occupés pas des boutiques et même des maisons d'habitation; mais dans les ponts modernes, on y a renoncé, à cause de la surcharge qui en résultait, du défaut d'aérage; et parce que le coup d'œil y perdait beaucoup. Figures 209 des planches.

Les têtes des ponts sont ordinairement couronnées par un cordon, composé d'un *tore*, d'un *filet* et d'un *cavet*. Ce couronnement est simple : c'est celui qui convient en général à l'architecture de ces ouvrages.

Quelquefois on emploie différents systèmes de corniches; mais il faut

les composer de *peu de membres* fortement prononcés. Les consoles, les modillons doivent être réservés pour les ponts placés dans les grandes villes.

Le caractère d'architecture des ponts est relatif aux circonstances de leur position; simple, sévère sur les routes; hardi, riche et varié dans les cités.

Les détails des diverses parties doivent être assortis à ces différents genres.

Les bossages, les refends, les congélations, les pointes de diamant, tout ce qui tient au genre rustique convient, dans quelques circonstances, à l'architecture des ponts.

En général, c'est le style des monuments environnants et les localités qui déterminent celui d'un projet de pont.

---

## RÉSUMÉ DE LA VINGTIÈME LEÇON.

DES FONDATIONS DES PONTS EN MAÇONNERIE. — DES BATARDEAUX. — DES ÉPUISEMENTS. — DES CAISSONS FONCÉS ET NON FONCÉS. — DU TRAVAIL A L'AIDE DES CLOCHES A PLONGEURS ET DES SCAPHANDRES. — DES ENROCHEMENTS.

Conditions spéciales des fondations des ponts en maçonnerie.

On a vu, précédemment, dans la leçon relative aux fondations en général, la classification des diverses natures de terrain, et les principes généraux sur cette importante matière.

Mais les fondations des ponts doivent satisfaire de plus, à la condition spéciale de résister aux efforts des eaux et des corps flottants entraînés dans les crues; en outre la présence permanente de l'eau, la continuité des besoins de la navigation, opposent souvent les plus grandes difficultés à l'adoption de tel ou tel système de fondation qui *aurait convenu sous d'autres rapports*.

Fondations sur les terrains de première classe.

Ainsi pour les terrains même de première classe, il est nécessaire d'engager les fondations des piles et culées dans des tranchées de plus de 1 mèt. de profondeur; afin d'éviter que les eaux ne détruisent l'adhérence des fondations avec le terrain solide, et que l'approfondissement du sol, quoique très-lent, ne laisse plus tard les fondations à découvert. Les draguages et fouilles, pour la mise à nu du terrain solide, seront ici d'ailleurs bien plus difficiles et coûteux que dans les viaducs.

Pour la même espèce de terrain, il peut arriver: que des fouilles ne soient, à raison de la présence des eaux, praticables qu'à l'aide de batardeaux d'en-

ceinte et d'épuisements très-dispendieux, et que cette nécessité détermine à relever le plan des fondations des piles ou culées, et à les asseoir sur une base artificielle *qu'on eût évitée* dans la fondation d'un viaduc ou de toute autre fondation hors de l'eau.

Cette base sera tantôt un massif en béton, comme au pont de Souillac (fig. 210 des planches), tantôt un pilotis avec enrochement, comme au pont de Saumur (fig. 211 des planches); quelquefois même il faudra les deux moyens réunis, lorsque, comme aux nouveaux ponts de Rouen et de Sèvres, le plan de fondation sera très-élevé au-dessus du lit de la rivière, et que les couches *superficielles* de ce dernier seront sujettes à des affouillements dans l'intervalle des piles et des culées (fig. 212 des planches). Figures 210, 211, 212 des planches.

En effet, dans ce dernier cas, des pieux isolés pourraient ployer, et même rompre; soit sous la charge supérieure, soit par l'effet des glaces et débâcles; la grande élévation du *centre de gravité de cette charge*, exposerait les pieux à s'incliner particulièrement de l'amont à l'aval, dans ces circonstances accidentelles. D'ailleurs des enrochements intercalaires aux pieux, n'y adhérant pas intimement, ne préviendraient qu'imparfaitement les effets ci-dessus; d'autant que le lit du fleuve étant par *hypothèse* affouillable sur une certaine hauteur, les enrochements en s'affaissant ultérieurement s'éloigneraient des pieux.

Au nouveau pont de Bordeaux construit par M. l'Inspecteur général des ponts et chaussées Deschamps, et composé de 17 arches en maçonnerie, chacune de 23 mèt. d'ouverture moyenne, de 16 piles et deux culées, on s'est borné à des enrochements entre les pieux de fondation, avec *crèche* de ceinture pour chaque pile ou culée. La Garonne y présente de 6$^{m}$,7 à 10 mèt. de profondeur d'eau à basse mer, et au moment de la haute mer cette profondeur devient de 11 mèt. à 15$^{m}$,50 et plus. Les courants de marée montante et descendante, y ont une vitesse moyenne de plus de 3 mètres par seconde. Ils agissent sur un fond de sable et de vase molle très-facile à déplacer. Figures 213 des planches.

Les sondes faites annonçaient le terrain solide à 12 mètres et même à 16 mètres au-dessous des basses eaux.

Les fondations de chaque pile ont été assises sur 250 pieux de bois de pin des Pyrénées, recépés à 3$^{m}$,75 au-dessous du niveau des plus basses eaux. Des enrochements remplissent la distance verticale *complémentaire* du plan de recépage au fond du lit.

Mais la stabilité de ces *enrochements partiels a été assurée par un enrochement général d'une culée à l'autre.* Enfin avant de procéder à la construc-

tion des arches, on a pris une mesure qui *devrait être toujours appliquée*, celle de charger chaque pile d'un poids d'essai supérieur de beaucoup à la charge permanente des arches réunie aux fardeaux éventuels, calculés à raison de 200 kilog. par mètre quarré. Au pont de Bordeaux cette charge a été de 4,000,000 de kilog., et a consisté en une pyramide de blocs de pierres de taille et de pavés de grès.

Les enrochements de fondation de ce pont enveloppés et agglutinés par la vase alluvionnaire ont, au bout de ving années, présenté une masse parfaitement résistante.

Le système de fondation du pont de Bordeaux comparé à celui du pont de Rouen, semble moins dispendieux ; mais dans certaines localités l'abondance *relative* des matériaux qui entrent dans l'une et l'autre, pourra renverser ces rapports.

On fait remarquer que dans tous deux, un grand châssis de ceinture immergé dès les premiers temps des travaux, a eu pour objet non-seulement de guider le battage, mais aussi d'empêcher les pieux de se déverser soit sous la charge directe des enrochements et du béton, soit par le gonflement des couches molles du sol en contre-bas de cette charge.

Fondations des ponts sur les terrains de deuxième classe.

Les corrosions par l'eau seraient très-redoutables pour les terrains de deuxième classe ; aussi outre l'encaissement ordinaire en palplanches ou pieux jointifs qu'ils exigent, *sinon sur le pourtour de l'enceinte des fondations, au moins aux deux têtes du pont*, ils doivent être recouverts d'un radier général continu. Ce radier général sera construit suivant les ressources des localités, en enrochements ou en fascinages par *plates-formes* ; en substituant dans ce dernier cas, et autant que possible, des couches de libages à celles de gravier des plates-formes ordinaires.

Si le terrain, quoique résistant, était susceptible d'être amolli par l'eau, par exemple, s'il était argileux; il deviendrait nécessaire d'exécuter ces radiers généraux ; soit en béton, soit en maçonnerie de libages et mortier hydraulique terminés par un pavage en moellons de champ.

Enfin si le cours d'eau était de nature torrentielle, et qu'il y eût un grand nombre de piles, surtout de *piles culées*, un *avant-radier* et un *arrière-radier*, en enrochements ou en fascinages, ou mixte, ne seraient pas surabondants. Ce sont ces moyens qui ont été employés avec succès sur un fond de sable, à la construction des ponts de Moulins et de Roanne sur la Loire, à celle du pont de Saint-Amand sur Sèvres, et à différents ponts restaurés en Italie sous l'Empire.

L'épaisseur du radier général au pont de Moulin est de $1^m,65$; ce radier repose sur une plate-forme en bois qui presse un corroi horizontal de terre glaise. Au pont de Roanne, le radier général a 1 mètre d'épaisseur, dont $0^m,68$ pour la première couche en béton, et $0^m,32$ pour la couche supérieure en dallages. Au pont de Saint-Amand, le radier général est une suite de voûtes renversées de $0^m,45$ de flèche sur $5^m,50$ environ de corde dont l'épaisseur à la clef est d'environ $0^m,50$. La couche en contact avec le terrain est en béton.

Figures 214 des planches.

Fondations des ponts sur les terrains de troisième classe.

Enfin pour les mauvais terrains de troisième classe, qui sont à la fois compressibles, susceptibles de corrosions et d'affouillements, il ne suffirait pas d'asseoir les fondations des piles sur de larges empattements avec pilotis de compression, ou plates-formes de béton, et même de réunir ces deux moyens, Il faudrait de plus :

1° entourer l'enceinte de *chaque fondation* d'une crèche de palplanches ou pieux jointifs, pour que la compression du terrain par le battage des pieux, se réalisât complétement;

2° former un radier général entre les piles et après le draguage des couches superficielles les plus molles du lit de la rivière. Mais ce radier devant ici remplir le double objet de contretenir les poussées latérales, et de préserver des corrosions les fondations des piles et culées, devrait être nécessairement :

Soit une plate-forme bordée sur le grillage d'étresillonnage mentionné à l'article viaducs,

Soit un épais massif de béton,

Ou enfin une plate-forme en maçonnerie surmontée d'une voûte renversée d'une forte épaisseur à la clef.

3° Si la rivière était torrentielle, il faudrait y annexer de plus, et comme pour les terrains de deuxième classe, un arrière-radier en plate-forme de bois, en enrochements ou en plates-formes de fascinages.

On pourrait encore au lieu d'*isoler en quelque sorte*, comme il vient d'être indiqué, la fondation de chaque pile du radier général; effectuer un draguage profond sur toute la largeur de la rivière; battre ensuite les pieux de compression dans l'emplacement de chaque pile; les recéper au niveau de la fouille; et recouvrir ensuite tout le lit de la rivière d'un épais massif de béton ou de maçonnerie ordinaire, qui servirait à répartir la charge du pont sur la surface du fond de la rivière. Le massif devrait évidemment présenter des surépaisseurs, faisant fonction de

contreforts dans les zônes draguées dont la résistance serait la moindre.

Le choix entre les divers modes de fondation, exige un grand nombre d'essais sur la résistance du terrain, d'observations sur le régime de la rivière et de ses effets sur le fond, et une étude approfondie d'une foule de questions techniques, financières, et même administratives. On trouvera plus bas quelques exemples dans des notes historiques sur des ponts anciens et modernes de grande dimension.

On va passer maintenant au mode d'exécution des divers systèmes de fondations exposés sommairement ci-dessus.

Traces pour l'exécution d'un pont en maçonnerie

La première opération est celle du tracé; on commence par fixer les deux axes ou lignes magistrales, celle de la route et celle de la rivière. On repère la première par des pieux battus sur les bords de la rivière ou par des dez en maçonnerie : des pieux ou dez semblables servent à repérer des parallèles à cet axe et particulièrement celles qui correspondent aux têtes du pont.

Lorsque la largeur de la rivière a été mesurée par plusieurs opérations successives, soit directement, soit par les procédés trigonométriques, on en marque le milieu, à l'amont et à l'aval, par des pieux sur lesquels on grave la ligne milieu du thalweg : des pieux analogues servent à repérer les parallèles à cet axe, indicatives des axes et rives des piles et culées et du milieu des arches.

On part de ces lignes pour distribuer toutes les mesures partielles, soit horizontales, soit verticales.

Extérieurement au tracé et sur un point fixe et invariable, on arrête un repère pour les côtes de hauteur, peint en partie blanc, en partie noir. Il est placé ordinairement à l'étiage des eaux, qu'il indique par une ligne horizontale.

Execution de fondations des ponts en maçonnerie sur des rivieres torrentielles ou avec marées.

Lorsque le pont doit être élevé sur des rivières torrentielles presqu'à sec dans certaines saisons de l'année, ou sur des rivières à marées dont le lit découvre à marée basse soit quotidiennement dans les vives eaux, ces deux circonstances peuvent être fécondes en grandes économies dans les fondations.

Ainsi, dans le premier cas, en approvisionnant à l'avance tous les matériaux et les réunissant sur le lieu des travaux; en accumulant un grand nombre d'ouvriers et d'agens dans un temps donné; enfin en travaillant au besoin jour et nuit, on peut se mettre rapidement à l'abri d'une crue d'eau. Les ravages de celle-ci peuvent d'ailleurs être resserrés dans un champ

étroit, en effectuant par parties certaines espèces d'ouvrages, et en les couvrant par des batardeaux *seulement submersibles*, dont l'enceinte serait vidée après le passage de la crue.

Dans le second cas, celui des rivières à marées, les ascensions alternatives et périodiques de l'eau peuvent être prévues. L'emploi de batardeaux submersibles enveloppant une enceinte plus ou moins étendue, suffira dans la plupart des cas pour asseoir le plan des fondations; soit sur pilotis battus au préalable, soit de toute autre manière. Mais il y aura à combiner, dans chaque localité, la capacité des enceintes, et la hauteur des batardeaux relativement, au jeu des marées, à la marche et aux moyens d'épuisement de l'eau épanchée par dessus ces batardeaux, et surtout relativement au personnel des ouvriers et aux approvisionnements de matériaux pour la pose.

Le battage des pilotis se fait généralement par les appareils ordinaires, posés sur des radeaux, bacs, chalands, chaloupes et autres embarcations, ou sur des plates-formes fixes d'échafaudage. Ces plates-formes sont d'ailleurs établies sur des pilotis à faux frais, battus par les sonnettes à flot; elles peuvent être submersibles ou insubmersibles aux hautes eaux, suivant la rapidité avec laquelle le battage doit être fait. Battage des pilotis de fondation d'un pont en maçonnerie.

Le battage à flot des pilotis parait moins dispendieux que celui sur plates-formes fixes; mais il ne se prête à aucune précision dans la mise en fiche des pieux, et il est entravé par toutes les crues et souvent par l'insuffisance des eaux à l'étiage. On lui préfère ordinairement le battage sur plates-formes; on a soin seulement de disposer les pieux d'échafaudage, non-seulement de manière qu'ils ne puissent pas entraver les opérations ultérieures, mais même de manière qu'ils y puissent concourir, en portant ultérieurement les échafaudages nécessaires aux versements de béton, pose des piles et des maçonneries de voûtes, etc., etc.

Pour assurer la régularité du battage, il est essentiel d'enfoncer d'abord les pieux directeurs d'alignement, c'est-à-dire, ceux des changements d'alignement, et les premiers et derniers des files longitudinales et transversales, puis de les réunir à leurs têtes, et à leurs pieds; le plus près possible du sol, par des couples de ventrières amovibles ou à demeure, reliées avec les pieux directeurs par des boulons. C'est dans les coulisses ainsi formées par ces groupes de pièces à deux étages, qu'on engage ensuite les pieux intercalaires, et ceux-ci ne peuvent plus alors dévier de leurs alignements. On a employé ces précautions aux fondations des nouveaux ponts de Rouen et Bordeaux. Figures 212 et 213 des planches.

L'on s'est servi, aux travaux du pont de Sainte-Maxence, de la force du courant pour le battage des pieux de fondation, en sorte qu'il n'y avait que trois hommes à chaque sonnette. Le même moteur y a été appliqué au levage des pierres par des grues. (Voir les *Œuvres de Peyronnet.*)

Récépage des pieux. Le récépage des pieux se fait, soit aux basses eaux, soit à l'aide de batardeaux submersibles quand la profondeur d'eau est peu considérable, par exemple au-dessous de 2 mètres. Pour des profondeurs plus grandes, on a recours aux machines à recéper sous l'eau.

Figures 215 des planches. Il existe un assez grand nombre de ces machines; les unes sont décrites dans les ouvrages de Décessart et Gauthey, les autres dans la I[re] collection lithographique de l'*École des ponts et chaussées*. La machine de M. Décessart peut fonctionner à 5 mèt. sous l'eau, et quand elle est établie sur une plate-forme bien horizontale, elle peut enlever facilement sur un pieu déjà récépé une tranche horizontale de 4 millim. d'épaisseur; mais on a remarqué que le surplomb de l'armature de la scie tendait à donner de l'inclinaison au plan de récépage; cette machine est d'ailleurs lourde, encombrante et compliquée. M. l'Ingénieur Vauvilliers y a substitué, avec succès, aux travaux de fondation du nouveau pont de Bordeaux, un appareil à scie circulaire; mais le rayon de la scie devant être égal au diamètre du pieu, il peut en résulter quelques difficultés dans le récépage de très-gros pieux; car leur culasse, quand ils ont été battus par le petit bout, a quelquefois jusqu'à 60 centim. et même 1 mètre de diamètre.

Figures 216. des planches.

Draguages. Les draguages à faire avant l'établissement des fondations s'opèrent, si la profondeur d'eau est peu considérable, à l'aide de *louchets*, de *hollandaises*, et de petites cuillères à grands manches manœuvrées par deux ou quatre hommes; les produits sont jetés dans la barque même qui porte les ouvriers, ou dans une petite *marie-salope* qui la suit. Quelquefois ces cuillères sont manœuvrées par des treuils à manivelles fixés sur des pontons, d'un tirant d'eau approprié; d'ailleurs, suivant la résistance du fond, on adapte à ces treuils des engrénages simples ou doubles.

Pour des profondeurs de plus de 2 à 3 mètres, on a recours aux machines à curer. Tantôt ces machines ont pour objet seulement d'agiter et de pousser les couches molles du fond de l'amont vers l'aval, en les abandonnant aux cours des eaux; tantôt pour les terrains plus résistants, les machines à la fois creusent le sol et rejettent les produits dans les cavités du fond, ou élèvent les déblais et les versent dans les maries-salopes. Quelquefois ces appareils sont établis sur des plates-formes d'échafaudage d'une hauteur variable, ou sur des embarcations. Dans l'un et l'autre cas, il faut qu'ils

puissent fonctionner malgré les différences de hauteur entre le fond à draguer et la plate-forme qui supporte l'appareil. On trouvera plus de détails sur les machines à curer à la *Section de la navigation extérieure*, qui traite des ports. On renvoie d'ailleurs au 2me volume du traité de Gauthey sur la *Construction des ponts*; aux œuvres de Regemorte, aux articles insérés par les Ingénieurs Bouvier, Magdelaine, Masquelez, Corne, Kermaingant, dans les *Annales des ponts et chaussées* de 1831, 1832, 1833, 1836; et enfin aux collections lithographiques de l'*École des ponts et chaussées*.

Lorsque le fond du lit d'une rivière doit être dressé régulièrement, soit pour le coulage d'un massif de béton, soit pour l'échouage des caissons dont il va être question ci-dessous, on peut atteindre ce but, en enlevant les éminences au-dessus du plan de niveau qu'on veut obtenir, ou en rapportant du terrain additionnel pour remplir les creux; l'on a pris le plus souvent ce dernier parti. Aux fondations des écluses de chasse de Dieppe et du Tréport on se servait de trémies remplies de galets, dont la description se trouve dans les œuvres de Décessart; mais M. l'Ingénieur Magdelaine dans l'article déjà cité, et publié dans les *Annales des ponts et chaussées* de 1832, donne la préférence au système de régalage, et décrit l'appareil qu'il a employé pour cet objet. Régalage. Figures 217 des planches.

Si le terrain doit être dragué sur une profondeur de plus de 1 mètre, et que son peu de consistance fasse craindre des éboulis dans les parois des fouilles, on bat sur le pourtour, des groupes de pilotis bordés à faux frais, ou accompagnés de palplanches intermédiaires. Au pont de Saumur on avait adossé à ces pilotis de retenue, des rangées superposées de saucissons bourrés en gravier.

Les plates-formes ou grillages en bois, soit qu'ils doivent reposer sur le terrain naturel régalé, ou sur des pilotis, peuvent être immergés et fixés sous l'eau sans batardeaux submersibles ou insubmersibles, lorsque la rivière n'a point une trop grande vitesse, et que la profondeur d'immersion n'est pas trop considérable. En effet, il suffit d'en assembler toutes les parties sur les rives du cours d'eau ou sur un radeau, de les mettre à flot, de les conduire à l'emplacement de la fondation, d'y engager *les têtes saillantes* d'un certain nombre de pieux de guide qui seraient récépés ou arrachés ultérieurement, puis de couler les grillages bien uniformément en les chargeant de poids en pierres ou fonte. Pose des grillages de fondation des ponts en maçonnerie.

Si le grillage doit échouer sur un pilotis bien battu, on peut lier aux têtes des pieux les pièces du grillage en munissant ces derniers de chevilles enfoncées à moitié avant l'immersion, et qu'on achève d'enfoncer sous

l'eau au moyen de longues barres de fer, ou de pièces de bois dont la tête est hors de l'eau. Si l'on n'est pas sûr de la régularité du battage, on borde le dessus du grillage sinon en madriers jointifs, au moins en madriers ayant au maximum 8 à 10 cent. de vides intercalaires.

Caissons non foncés pour fondations en béton.

Les massifs de béton circonscrits à l'enceinte des fondations d'une pile ou d'une culée de pont, sont formés souvent à l'aide de caissons flottants sans fond, que l'on construit à terre ou sur l'eau, qu'on met à flot et fait échouer dans l'emplacement voulu. Les parois verticales ne se démontent pas; elles restent adhérentes à la maçonnerie de béton qu'elles préservent ainsi dans les premiers temps du coulage du béton, de l'action des eaux et du choc des corps flottants; mais ce moyen ne dispense pas toujours d'enrochements au pourtour extérieur des caissons. Le versement du béton dans les caissons se fait d'ailleurs par les procédés déjà indiqués pour ce genre de maçonneries. Ce système, depuis longtemps en usage en Italie, surtout pour les travaux maritimes de la Méditerranée, a été employé à plus de 5 mèt. sous l'eau, à la foudation de la pile neuve du pont Notre-Dame de Cahors, par feu M. Sganzin; et M. l'Ingénieur Vicat en a fait de nouveau usage pour les fondations du pont de Souillac. Il convient exclusivement sur un sol rocheux.

Figures 210 des planches.

Mais pour d'autres terrains on peut lui substituer, avec économie, une rangée de pieux jointifs ou avec palplanches intercalaires battus autour de la fondation. Ce dernier mode est d'ailleurs le seul applicable aux massifs de béton qui formeraient radiers entre les piles ou culées, et pour lesquels il serait impossible d'avoir une seule caisse. Les têtes des pieux et palplanches ci-dessus en dépassant le niveau des eaux, empêchent le courant de délaver et d'entraîner les couches de béton.

### *Système de fondations par batardeaux et par caissons foncés.*

Pour établir sous l'eau et au-dessous des plus basses eaux, les premières assises des fondations en maçonnerie ordinaire des piles ou culées, soit sur le terrain naturel préparé, soit sur un massif de béton, soit sur pilotis, trois moyens se présentent : 1° celui des batardeaux insubmersibles ou submersibles avec épuisement; 2° celui des caissons foncés qui dispensent d'épuisements; 3° celui de la cloche à plongeur.

On doit assimiler, du reste, au deuxième mode, celui des bâtiments flottants ou embarcations remplis de maçonnerie ou d'enrochements, et coulés sur le fond, procédé qui a été employé pour les fondations des piles

du Pont-Royal, à Paris, et pour celles de quelques ouvrages hydrauliques des ports de mer. (Voir les œuvres de Bélidor.)

Il n'y a point de préférence exclusive à donner à l'un de ces modes sur l'autre. Dans les rivières peu profondes, à régime régulier et vitesse modérée, où le fond, quoique pénétrable aux pieux et palplanches des batardeaux leur donne cependant un appui latéral contre la poussée de l'eau, et n'abonde pas en voies d'eau latérales et de fond, les batardeaux seront généralement adoptés. Dans les autres circonstances, il faudra opter entre les caissons ou la cloche à plongeur; d'ailleurs, il convient de remarquer que, si l'on a plusieurs piles à fonder, les parois montantes des caissons, par un simple démontage, peuvent resservir en y ajoutant un nouveau fond; tandis que la démolition régulière d'un batardeau qu'on voudrait faire resservir coûterait quelquefois autant qu'un batardeau neuf.

Travaux sous l'eau à l'aide de la cloche à plongeur et des scaphandres.

La cloche à plongeur, qui n'avait d'abord été considérée que comme un appareil de visite et de recherche au fond de l'eau, susceptible tout au plus de suppléer avec avantage aux marins plongeurs, a été appliquée depuis à l'exécution d'un grand nombre d'ouvrages, et particulièrement de ceux qui, même *à ciel découvert, n'auraient pu admettre qu'un petit nombre d'ouvriers*.

Ainsi, l'on y a recours sous l'eau pour forer et charger des mines, pour refendre des masses de rocher, réunir des pièces de charpente, les cheviller, régaler des enrochements, des massifs de béton, et pour exécuter des maçonneries de toute dénomination, etc., etc.

L'on sait que cet appareil, fondé sur la compressibilité de l'air et sur la tension avec laquelle il réagit, consiste en une cuve renversée, quadrangulaire ou arrondie, imperméable à l'eau du dehors et à l'air du dedans. Le renouvellement de ce dernier se fait 1° en expulsant l'air vicié par des tuyaux qui communiquent avec la surface de l'eau ou par une pompe aspirante; 2° en important de l'air frais par une chaîne sans fin de petits barillets ou par une pompe à air foulante.

La cloche à plongeur a été exécutée tantôt en bois cerclé avec de nombreuses armatures en fer, tantôt en fonte de fer. La cloche est supportée soit par une plate-forme d'échafaudage sur laquelle roule le treuil de suspension, soit par un système de *bigues* (matereaux verticaux), appuyé sur un petit *ponton*. Les figures 218 des planches représentent diverses cloches à plongeur employées en Angleterre et dans les ports de Toulon et Cherbourg. A Cherbourg, on a expérimenté que les mêmes ouvriers peuvent rester deux heures consécutives sous l'eau, et à une profondeur

Figures 218 des planches.

de 12 à 13 mètres, c'est-à-dire dans une masse d'air comprimé presqu'à la pression de deux atmosphères.

L'intérieur de la cloche est éclairé par des verres lenticulaires ménagés dans le dessus. Des signaux convenus établissent une correspondance entre les travailleurs sous la cloche et les hommes placés hors de l'eau ; un signal spécial avertit quand il faut élever immédiatement l'appareil. Les dispositions prises jusqu'à ce jour, pour l'immersion et l'émersion de la cloche, sont encore très-imparfaites. Afin de diminuer la force motrice, on a employé des combinaisons d'engrenages et de poulies, qui portent presqu'à 15 minutes le temps de la montée sur 8 à 9 mètres de profondeur. Cela est évidemment beaucoup trop long. Un contre-poids beaucoup plus pesant que la cloche semblerait de beaucoup préférable; car la cloche ayant été émergée rapidement pour le travail, les manœuvres *hors de l'eau* relèveraient ensuite le contre-poids à loisir. L'économie de force motrice est d'ailleurs illusoire; car les mouvements du ponton ou ceux du treuil de suspension de la cloche, dans le déplacement d'un point à l'autre, exigent déjà beaucoup de bras, indépendamment de ceux qu'emploient le bardage et la descente sous l'eau des matériaux à mettre en œuvre.

La pompe à air, si elle était employée seule, pourrait compromettre quelquefois l'existence des travailleurs; il sera donc convenable d'associer à cette machine le *chapelet* de *barillets* mentionné ci-dessus. Le prix élevé d'un appareil complet de cloche à plongeur (une cloche en fonte de fer avec sa pompe à air coûte seule 7,400 fr.), le petit nombre d'hommes qui peuvent y fonctionner, les gênes de toute espèce de ce mode de travail assez insalubre, en restreignent l'usage aux catégories d'ouvrages sous l'eau déjà mentionnées, et *encore dans l'hypothèse que l'on ne sera pas pressé par le temps*.

On ne s'est pas rendu d'ailleurs un compte exact des dépenses comparatives de ce mode de travail et de ceux par batardeaux, et par caissons foncés.

On emploie aujourd'hui, aux État-Unis, pour le travail sous l'eau, des *scaphandres* en caoutchouc et cloche en verre, dont les fig. 219 des planches donnent les indications. Le renouvellement de l'air se fait par tuyaux en communication avec une pompe à air hors de l'eau. Avec cet appareil, un ouvrier peut rester sous l'eau avec la faculté de marcher en tous sens, qu'il n'aurait pas sous une cloche à plongeur. Toutefois cette invention convient plutôt pour des visites et recherches sous l'eau que pour des travaux manuels.

Figures 219 des planches

Voici au reste les principaux détails relatifs aux deux autres modes de fondation.

Si l'économie réclame le moindre développement possible de batardeaux, elle se trouve souvent aussi, dans la moindre capacité des surfaces des enceintes à épuiser et dans le fractionnement des chances d'avaries. Enfin, il faut se ménager les moyens d'installer les machines d'épuisement avec leurs appareils moteurs, et d'employer simultanément tous les ouvriers nécessaires dans l'enceinte abritée par les batardeaux. Système de fondation par batardeaux avec épuisements.

Ainsi, suivant l'ouverture des arches, la construction ou non de radiers intermédiaires entre les piles et les culées, il conviendra; de faire tantôt des batardeaux partiels, tantôt des batardeaux comprenant, dans une même enceinte deux ou un plus grand nombre de piles ou de culées; enfin d'avoir des parois de batardeau communes à plusieurs enceintes avec des *moyens de communication facultatifs*. Les travaux du pont d'Orléans décrits dans les œuvres de Peyronnet, présentent des exemples de bonnes dispositions locales de batardeaux.

*Des batardeaux.*

Les batardeaux peuvent être formés : de simples digues en terre; de digues en terre adossées à une parois en bois; de simples parois en bois accorées à l'intérieur ou se soutenant les unes par les autres; ou enfin de coffres en bois remplis de terre. On peut aussi combiner ces derniers moyens, et établir, par exemple, des hausses en bois sur une digue en terre.

M. l'Ingénieur en chef Beaudemoulin a fait sur l'emploi de la toile clouée à demeure, ou susceptible de se dérouler sur des panneaux, des essais desquels il résulte, qu'elle peut résister à une charge d'eau de 1m,40 de hauteur non-seulement sans rompre, mais sans être traversée par l'eau. Aussi cet Ingénieur indique ce moyen comme applicable, soit pour arrêter les voies d'eau d'un batardeau avarié, soit pour établir un batardeau amovible en tout ou partie, qui suivrait les variations des eaux extérieures, et réduirait ainsi au minimum la hauteur des épuisements. Batardeaux en toile.

L'épaisseur d'un batardeau en terre, ou digue, se calcule par des considérations analogues à celles qui ont été indiquées pour l'épaisseur des murs de soutènement d'eau, et de manière à ce que la masse résiste au glissement, et au pirouettement, non-seulement sous la charge de l'eau, mais Batardeaux en terre.

*aussi sous son choc.* On est dans l'usage de donner aux digues une épaisseur moyenne égale à celle de la hauteur de l'eau ; on voit que par suite de l'espace qu'occupent les digues, leur emploi est limité aux petites profondeurs d'eau.

Si elles sont appuyées contre une paroi résistante en bois, leur épaisseur peut être réduite de beaucoup, et même à moins de 1 mètre ; parce que la paroi en bois a pour objet alors, de résister à la poussée et au choc de l'eau, et que la digue en terre n'a plus que celui d'arrêter les filtrations. Les parois en bois ont la forme de fermes équidistantes, réunies soit par des bordages horizontaux, soit par des ventrières haut et bas, contre lesquelles s'appuient des palplanches verticales jointives. Les fermes sont ordinairement en deux pieux, dont l'un arrase le niveau de l'eau, et l'autre reste au-dessus, et qui sont liés entre eux par des écharpes obliques.

Figures 220 des planches.

Si les diverses parois d'un batardeau d'enceinte ne sont pas assez éloignées pour se prêter des secours, ou si elles sont voisines de parois fixes ; on peut diminuer leur *résistance individuelle*, en intercalant des étrésillonnages en bois, horizontaux ou obliques d'une paroi à l'autre, de manière à équilibrer les poussées de l'eau. La force de ces étrésillonnages doit être calculée comme pour des pièces chargées de bout.

Figures 221 des planches.

Batardeaux avec pieux jointifs à rainures et languettes.

Pour empêcher les filtrations d'eau et être dispensé des digues en terre, on a eu recours, particulièrement dans les ports de mer, à des pieux équarrés *jointifs à rainures et languettes*, qui, après la démolition d'un batardeau spécial, resservaient à d'autres, et avaient encore une valeur notable même après l'exécution complète des travaux. Ce système, combiné avec des accorrages obliques et des étrésillonnages intérieurs, a été employé avec un grand succès pour la construction de l'écluse d'entrée des formes de *recouvrance* à Brest, les réparations des Darses de Venise sous l'Empire, et pour la construction de l'écluse de la nouvelle forme du port militaire de Lorient.

Figures 222 des planches.

Batardeaux avec coffre.

Si chaque section d'un batardeau doit résister, par *elle-même*, à une grande charge d'eau et à des courants rapides qui délaveraient les terres d'une digue, on a recours aux batardeaux à coffre.

La charpente qui constitue le batardeau est formée d'une double file de pieux, espacés ordinairement de $1^{m},30$ de milieu en milieu dans chaque file, et la distance entre les deux files dépend de l'épaisseur du batardeau. Après avoir lié les têtes des pieux de chaque file par des liernes ou ventrières placées à l'intérieur, on bat en dedans de ces ventrières des palplanches jointives. Comme la poussée des terres qui

Figures 223 des planches.

remplirait le coffrage, tendrait à écarter ses deux parois; on les réunit souvent par le bas à la hauteur de l'étiage, à l'aide de tirants en fer, dont le faible diamètre ne peut donner lieu aux filtrations qu'occasionneraient des pièces transversales en bois. On relie les ventrières insubmersibles de tête de chaque file, par des tirants analogues ou par des entretoises en bois qui s'y assemblent à *mi-bois* et à *mentonnet*.

La figure 223 des planches est le profil le plus ordinaire d'un batardeau et indique l'assemblage et la position des pièces élémentaires.

L'épaisseur des batardeaux à coffre pourra se déterminer; en faisant entrer dans les calculs, à la fois, l'inertie de la terre de remplissage du coffre, et la résistance à la rupture des pieux et palplanches; mais cette dernière dépend elle-même de la résistance latérale du terrain, qui varie entre des limites très-éloignées. On est dans l'usage de donner à un batardeau à coffrage *non accoré à l'intérieur*, une épaisseur égale à la hauteur d'eau à soutenir quand elle n'excède pas 3 mètres; et d'y ajouter $0^m,32$ pour chaque mètre de hauteur excédante. Ces dimensions seraient évidemment susceptibles de réduction, si le batardeau était rempli en béton au lieu de l'être en terre; et il est convenable de prendre ce dernier parti toutes les fois que le massif de béton pourra être ultérieurement *partie intégrante* du *système de fondation* et ne sera pas sujet à démolition.

Les batardeaux trop minces ont l'inconvénient de ne pouvoir pas servir comme chemins de service pour les travaux de fondation, et c'est cette considération particulièremeut qui a fait établir la règle précédente.

Quand les batardeaux sont très-élevés, comme l'était celui de l'avant-port du nouveau port de Cherbourg, on les construit en gradins, ce qui concilie une grande largeur d'empattement utile pour arrêter les filtrations, avec la réduction progressive du volume des terres de remplissage. D'ailleurs ces gradins deviennent autant de paliers pour les dépôts des matériaux et la circulation des ouvriers. Batardeaux à gradins. Figures 224 des planches.

Quel que soit le système de batardeau avec digue, celle-ci doit être encaissée, enracinée dans le sol par le draguage des couches molles superficielles; et il faut toujours enlever les graviers qui laisseraient passer l'eau au-dessous des corrois. Ces derniers se font avec la terre végétale ordinaire, ou avec de la glaise qu'on pilonne par couches minces sous l'eau, en ayant soin que les pilons *soient dentelés*, afin que les couches se lient entre elles. L'argile sablonneuse forme de très-bons corrois; et on peut lire dans les *Annales des ponts et chaussées* de 1832, un article inséré par M. l'Inspec-

teur divisionnaire *Fèvre*, anuonçant que le sable fin a réussi parfaitement dans des batardeaux en terre qui soutenaient des charges d'eau de $2^m,50$. Au canal Saint-Martin on s'est servi, également avec succès pour corrois, de terre sablonneuse mélangée avec $\frac{1}{10}$ ou $\frac{1}{15}$ de son volume de chaux ordinaire pâteuse.

Figures 225 des planches.

MM. les Ingénieurs Goury, L'hoste et Devilliers ont proposé pour des profondeurs médiocres, un système de batardeaux amovibles ou facilement démontables, représenté dans les figures 225 des planches.

Des épuisements.

Il arrive fréquemment que, malgré l'imperméabilité des batardeaux et digues de soutènement d'eau, les appareils d'épuisement ne parviennent pas à étancher l'enceinte des travaux. La cause en est dans des *sources de fond* dont les eaux sourdent de bas en haut. Quand elles sont isolées, on parvient quelquefois à les étouffer, avec des mottes de terre glaise mêlées à de l'étoupe; par des sacs de toile remplis de cette même matière, ou de chaux vive, ou de plâtres ciments. On les renferme souvent aussi dans une cuve en béton enveloppée d'un petit batardeau élevé jusqu'au niveau des eaux de la rivière. Mais dans les terrains homogènes et uniformément perméables par le fond, il n'y a d'autres ressources que celle d'un batardeau *horizontal* ou *de fond*, exécuté soit avec des plates-formes en bois, ou avec de grandes toiles goudronnées chargées d'une épaisse couche de 40 cent. à 50 cent. de terre glaise ou de béton. Cette couche doit être toujours en béton, si le terrain perméable se trouve précisément sous l'emplacement des fondations à élever.

Dans le choix des moyens d'épuisement, il entre une foule de considérations. Plus un appareil unique est puissant, plus son chômage en cas d'avaries est nuisible. L'intérêt de la dépense d'acquisition et d'installation est d'autant plus onéreux, que les travaux doivent avoir moins de durée. D'ailleurs, il est impossible de prévoir à l'avance la quantité d'eau qu'on aura à enlever dans un temps donné.

Il est donc préférable, en général, pour un épuisement temporaire, d'employer concurremment plusieurs appareils simples, qui se suppléent mutuellement en cas de chômage, qui soient d'une réparation facile et qu'on puisse multiplier au fur et à mesure des besoins. Ces appareils doivent être tels qu'ils fonctionnent malgré les *troubles*, et les petits corps étrangers qui seraient mêlés à l'eau.

Enfin la dépense d'épuisement se compose du volume d'eau et de la hauteur à laquelle ce volume est élevé. Il est donc essentiel que les appareils

versent l'eau à la *moindre hauteur que possible au-dessus du niveau variable des eaux extérieures*. Enfin le manque d'espace impose souvent la condition que les machines d'épuisement soient peu volumineuses et faciles à déplacer.

Machines d'épuisement.

Le baquetage avec des seaux et des pelles à la hollandaise ne convient guères qu'à de petites profondeurs, parce que, s'élevant par plusieurs étages de gradins, une grande partie de l'eau élevée retomberait dans la fouille. Ce moyen est le plus expéditif, le plus simple; mais il exige momentanément beaucoup de bras dont on n'a pas toujours ensuite l'emploi quand l'épuisement est terminé.

La vis d'Archimède a beaucoup d'avantages pour les épuisements ordinaires à 3, 4 ou 5 mètres de profondeur ; mais son inclinaison oblique est un empêchement dans beaucoup de circonstances.

Les chapelets verticaux exigent peu d'emplacement; leur produit est continu; mais ils sont sujets à de fréquentes avaries, et versent d'ailleurs toujours l'*eau à la même hauteur*.

Des comportes ou bariques mobiles autour de leurs anses ou d'axes de rotation qui les traversent, et élevées par des treuils sur échafaudages, ont été employées avec beaucoup de succès pour de grandes profondeurs; mais cet appareil est lent et encombrant.

Les roues à tympans, mues par des hommes ou par le courant lui-même, comme aux travaux du port d'Orléans (voir les Œuvres de Peyronnet), sont d'une installation coûteuse, difficile, encombrante, et élèvent également l'eau à des hauteurs superflues.

Les pompes aspirantes ordinaires, manœuvrées par des brimballes, ou par des cordelles à tiraudes, occupent peu d'espace, sont faciles à déplacer ; mais leur produit est faible, si leurs garnitures, heuses et chopines ne sont pas métalliques; et dans ce dernier cas, elles sont endommagées par les sables, graviers et autres corps qui montent avec l'eau. D'ailleurs ces machines élèvent l'eau toujours au même niveau, à moins qu'on n'établisse l'évacuation par une communication entre les eaux extérieures, et le point du tuyau de pompe qui est immédiatement au-dessus du terme de la course des *heuses mobiles* ; mais cela n'est praticable que quand ces heuses mobiles *sont placées au-dessus des chopines fixes*.

Il est d'ailleurs possible d'appliquer divers moteurs aux appareils d'épuisement qu'on vient d'indiquer, tels que chevaux et bœufs; la force du courant lui-même ; le vent ; enfin les machines à feu fixes et *amovibles*. L'importance et surtout la durée des épuisements à faire ,

l'espace disponible pour les installations, et une foule de convenances locales doivent être prises en considération dans l'option à faire.

On trouve des détails sur les diverses machines d'épuisement dans les œuvres de Bélidor, de Peyronnet, de Régemorte, dans le tome II du Traité de la construction des ponts de Gauthey, dans la Collection lihtographique de l'École des ponts et chaussées, dans le Mémorial du génie, enfin dans les ouvrages relatifs à l'exploitation des mines. Les figures 226 des planches représentent l'installation de syphons d'épuisement faite en 1801 et 1802 aux fortifications de Metz.

Figures 226 des planches.

Des caissons foncés.

Le système de caissons foncés, employé pour la première fois en Angleterre par Labelye, au pont de Westminster (voir les œuvres de Bélidor), a été perfectionné en France; et on s'en est servi d'abord aux ponts de Saumur et de Tours, puis à la construction de la forme de radoub de Toulon, exécutée par le célèbre Groignard. Plus récemment, on en a fait usage aux fondations des ponts d'Austerlitz et de Iéna et à celles des nouveaux ponts de Rouen et Bordeaux. Les fig. 228 des planches indiquent les détails du caisson employé au pont d'Ivry par M. l'Ingénieur Emmery.

Figures 227 des planches.

Figures 228 des planches.

On s'est servi aussi de ce mode de fondation pour des quais et des écluses de navigation, des écluses de chasse et autres dans les ports de mer. (Voir les œuvres de Décessart pour la construction des écluses de chasse du Tréport et de Dieppe.)

Figures 229 des planches.

Un caisson est un ponton ou grand bateau plat, dont le fond est horizontal et composé soit de poutres jointives, soit de plusieurs plans de madriers croisés. Ses parois verticales sont formées par des châssis ou panneaux de madriers bien assemblés et calfatés, qui peuvent se démonter en se détachant du fond lorsqu'ils sont devenus inutiles. Ils y sont liés par des cordes ou courroies verticales, ou même par des tirants en fer verticaux dont le dévissage peut se faire au-dessus du niveau de l'eau. Des étrésillonages amovibles transversaux et diagonaux en plan, contretiennent la poussée de l'eau sur une des parois par celle qui s'exerce sur l'autre. On a quelquefois été forcé pour consolider le fond du caisson contre la poussée de l'eau, dans les premiers temps de la construction des maçonneries dans l'intérieur du caisson, d'arcbouter ce fond temporairement contre les parois verticales, ou de le consolider par des assemblages triangulaires en bois ou en fer, qu'on enlevait au fur et à mesure de l'exhaussement partiel des maçonneries.

Figures 230 des planches.

Pour rendre les épuisements plus faciles et pouvoir travailler par parties

Figures 236 des planches.

dans les caissons malgré les filtrations, on a quelquefois aussi pris la précaution de les diviser par des cloisons amovibles de séparation dans l'intérieur.

Le caisson est construit sur les rives comme une embarcation ordinaire et mis à l'eau ou à flot; ou bien il est élevé comme pour la forme de Toulon, sur un grand radeau. Ce dernier moyen a l'avantage d'éviter les déliaisons et chances de filtration qui résultent de l'opération de la mise à l'eau. Figures 232 des planches

Dans les ouvrages à la mer, on peut profiter des marées pour construire un caisson à sec et le faire flotter; c'est le parti que M. Décessart avait pris à Dieppe pour le caisson de l'écluse de chasse, et ce qu'on avait voulu imiter à l'écluse de Froissy du canal de la Somme Le caisson de Dieppe a été construit à l'abri d'une digue, dans un emplacement que n'atteignaient pas les hautes marées de morte eau, et qu'une tranchée dans la digue a mis en communication avec les dénivellations des marées de vive eau.

Pour la construction et la mise à l'eau des caissons des ponts d'Austerlitz et d'Iéna, on avait établi (fig. 233 des planches) des fermes de support et coulisses de lancement. Le caisson placé en travers avait été construit sur une plate-forme horizontale formée par des chantiers; pour la mise à l'eau, on a enlevé ces chantiers en soulageant le caisson par des crics, et en le faisant descendre sur des coulisses en pente, sur lesquelles son poids le faisait ensuite cheminer vers l'eau. Figures 233 des planches

Le caisson est conduit dans l'emplacement de la pile ou culée à construire, et là il est échoué immédiatement après que l'on s'est assuré qu'il n'y a aucun corps étranger arrêté sur le fond naturel, artificiel, ou dans le pilotis de fondation. On élève ensuite les maçonneries dans l'intérieur, et en enlevant au fur et à mesure, un poids équivalent de la charge qui avait déterminé l'échouage.

Quelques constructeurs ont préféré laisser le caisson à flot pendant la durée des constructions, de manière qu'il n'échouât que sous le poids des maçonneries suffisamment élevées. Ce mode fatigue moins les parois du caisson, épargne des épuisements; mais il a l'inconvénient d'exposer cette vaste charpente à toutes les variations et perturbations dans le régime des eaux, surtout lors des crues et débâcles; et, ce qui est bien plus grave, si le caisson échoue mal, ou qu'il y ait quelques corps interposés entre lui et le fond au moment de l'échouage, tout le travail des maçonneries faites peut être en pure perte; tandis que quand le caisson est vide, on peut remédier aux vices de l'échouage avant d'entreprendre les maçonneries dans l'intérieur.

Lorsque des maçonneries exécutées dans des caissons différents, doivent se lier pour ne former qu'une seule masse, on a eu recours à divers moyens : 1° on bat *au droit de l'interruption*, des palplanches qui serrent autant que possible les parements des deux maçonneries à réunir; puis on verse du béton dans cette espèce de coffre jusqu'au niveau où l'on peut continuer l'appareil des assises; 2° on peut jeter à ce dernier niveau, une petite voûte par dessus le vide, en la faisant reposer sur les maçonneries riveraines; 3° on établit transversalement des petits batardeaux dans les deux caissons bout à bout; on réunit par des panneaux à faux frais la lacune verticale entre les parois montantes des deux caissons; et on épuise cette petite enceinte; 4° on a recours à la cloche à plongeur.

Lorsque le pilotis de fondation sur lequel le caisson foncé doit être échoué, est garni d'enrochements ou de béton, il est quelquefois fort important que les eaux ne puissent couler entre le dessous du caisson et le dessus de l'enrochement ou le dessus du remplissage en béton intercalaire. On ne doit pas hésiter alors à recourir aux injections de mortier d'après le procédé de M. l'Ingénieur Bérigny pour remplir le vide en question.

Le même parti sera pris à *fortiori* quand le caisson devra être échoué sur un massif de béton.

On trouve des détails sur les caissons dans les Œuvres de Bélidor, de Décessart, dans la description de la forme de Toulon par Grognard, dans l'*Encyclopédie*, le *Traité de la construction* des ponts de Gauthey, tome II, la description des travaux du pont d'Ivry, la *Collection lithographique* de l'École des ponts et chaussées, et dans un article sur le caisson de fondation de l'écluse de Froissy (canal de la Somme), inséré par M. l'Ingénieur Mary, dans les *Annales des ponts et chaussées* de 1831.

Des radiers généraux. Les radiers généraux en béton, entre les piles et culées, exigent le draguage préalable des couches molles superficielles, et l'établissement déjà indiqué, d'une rangée de pieux et palplanches en charpente, arrivant au moins par le haut au niveau où doit s'arrêter le massif, et dont le but est d'empêcher les eaux de délaver les couches superficielles du béton.

Les radiers généraux en maçonnerie ne peuvent se faire qu'à l'aide de batardeaux submersibles ou insubmersibles. Ces radiers qui peuvent être, entre les deux têtes, parementés d'un simple pavé de moellons de champ, doivent présenter à chaque tête soit 1° une ligne de pierres de taille en très-gros blocs appareillés en plan, en voûte convexe vers l'axe du pont; 2° un encadrement de bois à compartiments, ayant pour longueur toute

la largeur de l'arche, et une largeur d'au moins $1^m,50$, et dont les cases seraient remplies en pavage de même espèce.

Les radiers généraux en fascinage s'exécutent par immersion et échouage, suivant les procédés détaillés ; dans les œuvres de Bélidor ; dans la note déjà citée, de feu M. Brisson, sur les digues de la Flandre hollandaise ; enfin dans le mémoire sur les travaux du Rhin, publié par M. l'Ingénieur en chef Desfontaines, dans les *Annales des ponts et chaussées* de 1833.

Les enrochements s'effectuent suivant les ressources des localités, soit avec des moellons de libage de diverses grosseur et dureté, soit avec les saucissons et paniers de gravier décrits dans la neuvième leçon, ou enfin avec des blocs factices en béton. Enrochements.

Gauthey a cherché à prouver dans le t. II de la construction des ponts, que la forme de matériaux la plus avantageuse à la résistance contre les courants, est celle d'une grande surface avec une faible hauteur ; mais il est une autre considération dont il n'a pas tenu compte, c'est la résistance des matériaux à leur propre poids, au choc, à l'accumulation des autres matériaux superposés, dans la multitude des positions qu'ils peuvent affecter dans un grand enrochement. Or, des matériaux très-plats et minces rompraient bien plutôt par ces dernières causes, que des matériaux cubiques. De plus, sur un fonds très-accidenté, ces mêmes matériaux jetés sous l'eau s'arrimeraient, s'entrelaceraient souvent moins bien, formeraient une masse moins solidaire que des blocs presque cubiques. Au reste, dans beaucoup de cas, le choix dépend bien plus des ressources locales, que des considérations précédentes.

Gauthey a calculé la limite inférieure du poids des blocs d'enrochement relativement aux vitesses *maximum des courants*, et aux pentes et talus extérieurs des enrochements. Il a trouvé que des blocs de $0^m,30$, dans le sens du courant, de $0^m,20$ dans le sens perpendiculaire au courant, et dont la pesanteur spécifique serait double de celle de l'eau pourraient résister :

Sur un plan horizontal à une vitesse d'eau d'environ 3 mètres par seconde.

Et sur un talus de 2 de base sur 1 sa hauteur, à une vitesse seulement de $2^m,30$.

Pour d'autres vitesses avec les mêmes talus et mêmes pesanteurs spécifiques de matériaux, les dimensions des blocs s'obtiendraient par l'équation : $\frac{z^2}{x} = \frac{V^2}{2}$ sur un plan horizontal, et $\frac{z^2}{x} = \frac{V^2}{1,2}$ sur le talus de 2 de base pour

de hauteur; $z$ étant la dimension des blocs parallèle au courant; $x$ la dimension perpendiculaire; V la vitesse du courant par seconde.*

Sur les rivières où la vitesse ordinaire est de $2^m,60$, l'expérience a fait construire des enrochements avec des pierres à peu près cubiques de 50 à 60c de grosseur; au pont Saint-Esprit on a employé des blocs de 70 centim. pour une vitesse ordinaire de $2^m,60$ dans les eaux du Rhône; mais cette vitesse s'élevait à $3^m,71$ à 4 mètres lors des crues. Gauthey considérant $4^m,05$ par seconde, comme une limite que la vitesse même des torrents les plus rapides dépasse rarement, pensait que des pierres, paniers ou blocs factices de $0^m,70$ de largeur, $0^m,35$ de hauteur, et d'une épaisseur égale au moins à $0^m,35$, conviendraient à tous les enrochements de fleuves et rivières.

On verra dans la dernière partie du résumé, que de pareils blocs seraient trop faibles dans les enrochements à la mer.

Lorsque le fond sur lequel on verse les libages d'enrochements, est mou; il y gonfle sous le poids de ces blocs, en remplit les interstices, et fait ainsi les fonctions du mortier ordinaire.

Si le courant charrie des sables et graviers, il les dépose souvent dans les mêmes interstices des enrochements, qui deviennent à la longue des espèces de roches factices. Il sera donc convenable dans les localités où ni le fond, ni les troubles de la rivière ne fourniront les éléments de ce *mortier naturel*, d'y suppléer en mêlant dans la formation des enrochements, des menus matériaux anguleux avec les gros blocs; mais par crainte que les pierrailles ne soient, dans leur chute sous l'eau, entraînées par les courants et amoncelées à l'aval, il faudra d'abord, dans chaque couche, former avec les gros blocs des espèces de *compartiments sous l'eau de l'amont à l'aval*. Si l'enrochement est en blocs factices de béton, du béton ordinaire devrait évidemment être préféré aussi pour l'agglutinement de tous ces blocs.

Mais si le fond de la rivière était affouillable en amont ou en aval des enrochements, il faudrait prévenir les déliaisons qui pourraient en résulter; soit en enfonçant les enrochements entre des files de palplanches formant *coffrages ou crèches*; soit en les enracinant, dans les fondations jusqu'à la profondeur où les affouillements pourraient descendre; soit enfin en suivant les progrès de ces derniers, et remplissant les vides à mesure qu'ils se formeraient, par de nouveaux enrochements, par des paniers bourrés de gravier, ou par des fascinages.

Au pont de Bordeaux on s'est servi de la cloche à plongeur pour régaler les enrochements et leur donner une assiette stable.

On a vu, du reste, dans la première partie qu'on a suppléé sur les rives du Rhin, à l'absence et au prix élevé des libages, par des paniers clayonnés bourrés de gravier.

Les ouvrages déjà cités et ceux de Pitrou, de Régemorte et Peyronnet donneront tous les détails nécessaires sur les échafaudages, machines et opérations du cintrement des ponts, de la pose des voûtes, du décintrement et des ouvrages complémentaires en maçonnerie.

---

## RÉSUMÉ DE LA VINGT-UNIÈME LEÇON.

NOTICES HISTORIQUES SUR LES TRAVAUX DE DIVERS PONTS EN MAÇONNERIE ANCIENS ET MODERNES. — DÉPENSES DE CONSTRUCTION DE QUELQUES-UNS DE CES OUVRAGES. — VIADUCS ET PONTS FIXES EN BOIS. — VIADUCS ET PONTS FIXES EN FER.

### *Notices historiques sur les travaux de divers ponts en maçonnerie anciens et modernes.*

#### Ponts étrangers.

*Pont de Trajan sur le Danube*, construit en l'an 120 de l'ère chrétienne.

La rapidité et la profondeur des eaux du Danube, la nature affouillable du fond avaient fait établir les piles du pont sur un radier général. Le radier avait été formé avec de grands bateaux chargés pêle-mêle de pierres, chaux, et sable et qu'on avait fait échouer sur le fond. Des sacs de toute grosseur, remplis des mêmes matériaux avaient servi à garnir les intervalles, et à établir des espèces de jetées autour des piles.

*Pont de la Trinité sur l'Arno à Florence*, bâti en 1570.

Les fondations de ce pont avaient été assises sur un radier général bordé et appuyé sur plusieurs piles de pieux. Un affouillement considérable qui s'était manifesté en 1811, par suite de la composition sablonneuse du fond, a été réparé par M. l'Ingénieur en chef Goury. (Voir les *Souvenirs polytechniques* de cet Ingénieur.)

*Pont de la Carraja sur l'Arno à Florence*, fondé en 1345, sur pilotis avec un radier général en maçonnerie, sur un terrain sablonneux.

*Pont d'Alexandrie sur le Tanaro*, exécuté antérieurement à 1487.

On avait établi sous l'Empire, des radiers en maçonnerie entre les piles et culées des ponts, afin de pouvoir y élever, à l'aide de piles nouvelles intercalaires, un barrage mobile à poutrelles, destiné à soutenir et à faire deverser les eaux du Tanaro dans les fossés de la citadelle.

*Pont de Corvo*, établi de 1300 à 1400 *sur le torrent de la Melza.*

Ce torrent roule sur un très-mauvais fond. On a établi, à 2 mètres en contre-bas des eaux moyennes, un radier général en enrochement, dont les têtes ont été formées de gros blocs cramponnés et soutenus en aval, par plusieurs files de pieux. L'assiette des piles se compose de quatre assises en hauteur, étagées en retraite les unes sur les autres, également en gros blocs cramponnés de 4 à 5 mètres de longueur.

*Vieux pont de Londres* édifié *sur la Tamise*, en 1176.

Le trop faible débouché des arches et la grande épaisseur des piles (elles avaient près de 6 mètres) rendaient fort difficile le passage des crues d'eau, et déterminaient une sorte de cataracte de $1^{m},50$ de chute sur la longueur des piles.

*Pont de Westminster, sur la Tamise*, exécuté en 1750.

Ce pont a été le premier ouvrage fondé sur caissons *foncés*. Ces caissons ouvrés en sapin avaient été échoués sur un sol naturel en pierres, cailloux gravier, dragué dans l'emplacement de chaque pile à 2 mètres en contre-bas de l'étiage. Chaque fondation isolée de pile et culée avait été d'ailleurs entourée d'une crèche de pieux battus au déclic par une sonnette à manége. Après l'achèvement du pont, un nouveau draguage qui avait été trop approfondi près de l'une des piles, fit couler le sable du terrain qui était sous le fond du caisson, et la pile tassa de 30 cent. On recintra et on démolit immédiatement les arches voisines; la pile fut chargée d'un poids considérable d'épreuve qui produisit un deuxième tassement définitif de 13 cent. à 14 centim. dans le premier mois. On reconstruisit les arches démolies, en ayant soin d'élégir les reins par des arceaux appuyés sur les voûtes. L'opération eut un succès complet.

*Pont d'Essex*, construit sur le *Liffey* en 1753, *à Dublin en Irlande.*

Ce pont a été fondé sur pilotis enfoncé jusqu'au rocher. La couche d'argile superposée à ce rocher a été garantie contre la corrosion par un radier général.

*Pont de Black-Friars sur la Tamise*, construit en 1780, sur les projets du célèbre Smeaton.

Ce pont avait été fondé sur un sol de gravier, en partie par batar-

deaux avec épuisements, en partie par caissons foncés Quelques piles étaient entourées d'enrochements enveloppés eux-mêmes par des palplanches. Néanmoins le pont fut affouillé et renversé par une crue extraordinaire pendant laquelle la différence du niveau des eaux, aux deux têtes amont et aval du pont, avait été de 1$^m$,20 à 1$^m$,50.

*Ponts de Cold-Stream sur le Tweed, et de Perth sur le Tay*, construits en 1766 et 1771, également sur les projets de Smeaton.

Le fond de ces rivières était du gravier compacte. Les piles ont été assises sur pilotis avec enrochements intercalaires, mais sans plate-forme de grillage intermédiaire, entre la première assise de maçonnerie, et le dessus des pieux et enrochements. Une crèche de palplanches entoure chaque fondation isolée.

*Pont de Ratisbonne sur le Danube*, exécuté avant 1200.

Les piles et culées sont fondées par pilotis sur un terrain graveleux; mais chacune est enveloppée d'une crèche de palplanches jointives, et défendue par des épis fort larges en coffrages de bois remplis d'enrochements.

### Ponts en France.

*Pont du Saint-Esprit* construit en 1285 sur le Rhône.

Les piles-culées de ce pont ont une épaisseur énorme, le tiers de l'ouverture des arches; et cette épaisseur est encore renforcée par de larges empattements. On présume que ces piles sont fondées sur enrochements entourés de crèches à 3 mètres de distance des parements, et qui s'élèvent à plus de 2 mètres *au-dessus* de l'étiage. Ces crèches présentent sur tout leur périmètre un double entourage de blocs de plus de 2 mètres de longueur; ce genre de fondation est encore consolidé par des épis qu'on entretient avec le plus grand soin. Le talus de ces épis est de 1 $\frac{1}{2}$ de base pour 1 de hauteur, et il en résulte une nouvelle réduction dans le débouché, qui dans les crues détermine de véritables cataractes.

*Pont de la Vieille-Brioude* élevé en 1454 sur l'Allier.

Ce pont avait éprouvé successivement deux sortes d'avaries : 1° les voûtes de 22 mètres d'ouverture surbaissées au tiers, bâties en *matériaux tendres*, s'étaient écroulées immédiatement après avoir été décintrées; 2° les fondations sur gravier compacte furent affouillées et le pont fut emporté dans une crue, bien qu'on eût battu en aval un coffrage de pieux dont on avait d'abord dragué l'intérieur et qu'on avait ensuite rempli d'enrochements.

*Pont Royal ou des Tuileries*, construit sur la Seine en 1690, sur les dessins du célèbre Mansart.

La première pile du côté des Tuileries se trouvant sur un mauvais terrain, a été fondée de la manière suivante : le terrain après avoir été dragué et aplani, a reçu par échouage la charge d'un grand bateau *marnais* rempli de matériaux. Le bateau échoué a été entouré d'une crèche de pieux et d'une digue en enrochements. On a construit ensuite une espèce de grande caisse renfermant des assises de pierres cramponnées et attenantes à ses parois. Après que cette caisse a été immergée, on a rempli les vides qui y restaient avec des moellons et du mortier hydraulique de Pozzolane. La fondation a été finalement chargée pendant six mois d'un poids d'épreuve supérieur de beaucoup à la charge permanente du pont; et comme sous ce poids, il ne s'était manifesté qu'un tassement de 2c,07, on a élevé avec confiance la pile et les arches attenantes.

*Pont d'Orléans sur la Loire*, terminé par Peyronnet en 1763.

Les arches ont 30 mètres d'ouverture moyenne. Les piles ont été fondées par batardeaux avec épuisements, sur plates-formes de grillage sur pilotis. La couche supérieure du fond était du sable graveleux sur 3 à 4 mètres de hauteur. Elle recouvrait des couches irrégulières de marne et de tuf. La perméabilité d'un pareil fond avait rendu les épuisements très-onéreux. Le battage d'ailleurs avait manifesté de grandes anomalies dans la profondeur de fiche des pieux ; aussi il y eut un tassement dans quelques piles après la construction ; on prit le parti fort sage de charger chacune de ces piles d'un poids d'épreuve de 639 tonn. en sus de celui des voûtes. Cette charge maintenue pendant cinq mois produisit un affaissement total de $0^m,50$ ; de plus, on élégit les reins au-dessus des piles, par des voûtes dont on cacha les ouvertures dans les deux têtes du pont.

Des affouillements s'étant manifestés postérieurement, on y obvia en battant en aval, sur toute la longueur du pont, deux files de pieux espacées de 4 mètres et recépées sous l'étiage. L'intervalle des deux files fut garni en enrochements. Les pieux sont presque jointifs dans chaque file.

*Pont Biais de Trelport sur la Marne*, bâti en 1760 par l'Ingénieur Chezy.

Les piles de ce pont qui n'avaient que $2^m,27$ d'épaisseur se sont renversées en 1815, quand on a fait sauter l'arche du milieu, et sous l'effort des arches latérales qui étaient en anse de panier de $23^m,40$ d'ouverture. Les piles étaient du reste fondées sur plates-formes de grillage et pilotis, à l'aide de batardeaux avec épuisements.

*Pont de Saumur sur la Loire*, terminé par Decessart en 1764.

Ce pont a été fondé par caissons foncés sur pilotis dans un terrain de gravier. On avait dragué le sable dans l'emplacement de chaque pile et culée, et on l'avait remplacé par des enrochements avant l'échouage des caissons. La surface supérieure de ces enrochements avait été tenue à 16 centimètres au-dessous du plan de recépage. Des crèches d'enrochements et de fascinages entouraient d'ailleurs chaque pile.

*Pont de Tours sur la Loire*, exécuté par Bayeux, en 1755.

Ce pont a été fondé sur pilotis, en partie par caissons foncés, en partie par batardeaux avec épuisements. Le fond de la rivière est, à Tours, un banc de de sable de 2 à 3 mèt. d'épaisseur sous lequel se trouve un tuf solide. Dans ce pont dont quelques voûtes éprouvent *aujourd'hui même* de nouveaux tassements dans les zônes vers la rive droite, il y avait eu déjà des écroulements d'arches sous l'Empire, et antérieurement, par suite d'affouillements dans les piles. Les glaces d'une débâcle avaient formé à l'amont une espèce de barrage sous lequel les eaux avaient pris une grande vitesse vers la rive droite. Il en était résulté que les pieux dégarnis de sable sur une partie de leur fiche s'étaient affaissés; on avait éprouvé beaucoup de difficultés à déblayer les décombres, et à enlever les plates-formes des anciens caissons. Le battage de nouveaux pieux, un radier général intermédiaire aux piles qui avaient été affouillées, les ont préservées de nouveaux dommages; mais malheureusement on n'a pas étendu ce radier à toutes les arches du pont; et les mêmes causes produisent probablement dans celles-ci les mêmes effets.

*Pont de Moulins sur l'Allier*, exécuté en 1764 par l'Ingénieur Régemorte.

Dans l'espace de 35 années, trois ponts élevés dans l'emplacement du pont actuel avaient été emportés par le double défaut d'un débouché beaucoup trop étroit, et d'un système de fondation mal approprié. Le fond du lit était une banc de gros sable presque impénétrable aux pilotis, mais susceptible de s'affouiller de 5 mètres de profondeur dans une seule crue. Régemorte établit un radier général de $1^{m},65$ d'épaisseur, et de 34 mètres de largeur de l'amont à l'aval, dont le dessus est à 1 mètre en contre-bas de l'étiage; et ce mode de fondation qui a nécessité l'emploi de batardeaux avec épuisements a parfaitement réussi.

*Pont de Dôle* établi en 1764, *sur le Doubs*.

Malgré un faux radier en aval, et des enrochements intercalaires aux pieux des piles, malgré le recépage de ces pieux à 2 mètres sous l'étiage,

des affouillements ont eu lieu à deux piles et ont entraîné la chute des arches latérales.

*Pont de Mantes, sur la Seine*, achevé par Peyronnet en 1765.

La construction des voûtes des trois arches de ce pont a donné lieu à des incidents fâcheux. On l'avait commencée par l'une des arches de rive, et la voûte était presque entièrement terminée sur cintre retroussé, alors qu'il n'y avait encore que dix cours de voussoirs à l'arche du milieu. Il en résulta une inégalité de poussée qui fit marcher de $0^m,12$ et déverser légèrement la pile intermédiaire; on activa jour et nuit la pose des claveaux de l'arche du milieu; mais pour que la deuxième pile de l'autre rive n'éprouvât pas à son tour un mouvement du même genre, on maintint par des tirants en bois l'écartement des cintres de l'arche du milieu; et cette précaution suffit.

*Pont de Neuilly sur la Seine*, exécuté par Peyronnet en 1774.

Ce pont est fondé sur plate-forme et pilotis, à $2^m,30$ sous l'étiage, par batardeaux avec épuisements. Le débouché en est trop considérable, et par suite il se forme des attérissements irréguliers, à l'amont, sous les arches, et en aval.

*Pont Fouchard sur le Thouet, à Saumur*, achevé par l'Ingénieur de Limay en 1782.

Les voûtes de ce pont sont en arc de cercle de 26 mètres d'ouverture sur $2^m,60$ de flèche; elles avaient été surhaussées de $0^m,35$ dans la pose et étaient restées un an sur leurs cintres. A la fin de l'année le tassement était de $0^m,10$; quarante jours après le décintrement, le tassement était de $0^m,17$. Les parapets et le pavage de la voie du pont ayant été posés subséquemment, il est survenu de nouveaux tassements qui ont donné aux parapets une légère courbure; elle était de $0^m,046$ sur 24 mètres, vingt ans après la construction.

*Pont de Chavannes sur la Saône, à Châlons*, construit par Gauthey en 1787.

Ce pont dont les arches ont 13 mèt. d'ouverture, a été élevé sur un radier général en maçonnerie de 1 mètre d'épaisseur, et de 16 mètres de largeur de l'amont à l'aval; le dessus a été tenu à 1 mètre en contre-bas de l'étiage. Le lit de la rivière était en gros gravier presque impénétrable aux pieux, et cependant affouillable.

*Pont de Frouart, sur la Moselle*, exécuté en 1788, par M. l'Ingénieur Lecreux.

Les piles et les culées ont été fondées par batardeaux avec épuisements à 2 mètres sous l'étiage, sur un grillage bordé, assis lui-même directement sur un fond de gravier très-solide. Chaque fondation isolée a été

défendue contre les affouillements par une crèche de pieux jointifs.

*Pont de Maligny sur le Sevin*, exécuté en 1788 par l'ingénieur Verbruge.

Il est formé d'une seule arche en arc de cercle à grande flèche de 26 mètres d'ouverture. La voûte a été formée de moellons de 8 à 10 centim. d'épaisseur, et de $0^m,25$ à $0^m,30$ de queue, taillés et appareillés comme la pierre de taille; d'où est résulté un déchet considérable de matériaux. Pour empêcher les cintres de se soulever au sommet pendant la construction de la voûte, et être dispensé de charger celle-ci temporairement, on avait commencé sur différents points, et fermé par trois *clefs*.

Le décintrement a été effectué au bout de quinze jours, et il s'est manifesté alors un écartement tout à fait *anomale* entre les têtes d'amont et d'aval. Chacune a pris *en plan*, une flèche de courbure de $0^m,16$ sur l'ouverture totale de 26 mètres.

*Pont de Roanne, sur la Loire*, terminé sous l'Empire, a été fondé comme celui de Moulins.

*Pont de Iéna, sur la Seine*, terminé en 1811 par M. Lamandé.

On sait que la voie de ce pont est de niveau. Il a été fondé par caissons sur pilotis récépés à $1^m,75$ au-dessous de l'étiage.

*Pont de Sèvres, sur la Seine*, terminé en 1820, par M. l'Ingénieur Vigoureux.

Les piles de ce pont ont été fondées également par caissons sur pilotis, chaque pieu supportait 53 ton.; les intervalles des pieux depuis le sol jusqu'au plan de récépage n'avaient été remplis que d'un béton peu hydraulique. On a attribué, en partie, à cette circonstance, des tassements de $0^m,07$ remarqués dans quelques piles, à la suite de l'explosion qui, en 1815, fit sauter deux arches; toutefois la sixième pile chargée en 1818 d'un poids supplémentaire de 144 ton., n'a éprouvé aucun nouveau tassement. On n'en a pas moins élégi tous les reins des voûtes, de manière à réduire d'un dixième la charge permanente sur les pieux.

On a déjà décrit précédemment les systèmes de fondation des ponts de Rouen, Bordeaux et Libourne. On se bornera à ajouter ici pour les deux derniers, que la pierre de taille et la brique y ont été employées concurremment de manière à former des compartiments ou caissons garnis en briques et encadrés par les pierres.

La chaussée des mêmes ponts est formée d'arceaux en briques portant une maçonnerie de cailloux à bain de mortier hydraulique, recouverte elle-même d'une couche de cailloux brisés.

Ponts récemment terminés.

*Pont de Givet sur la Meuse*, terminé en 1818 par M. l'Ingénieur Husson.

Ce pont est composé de cinq arches en anse de panier, d'environ $20^m,50$ d'ouverture sur $6^m82$ de flèche, avec piles de 4 mètres d'épaisseur. Ces piles ont été fondées par caissons foncés, sur un pilotis recépé à $1^m,50$ en contre-bas de l'étiage, et à 2 mètres au-dessus du fond. Les intervalles des pieux ont été, après un draguage préalable, remplis de bétonnage comme au pont de Rouen; ce massif était enveloppé par une crèche de pieux et palplanches protégée elle-même par des enrochements extérieurs.

Le fond de la rivière était du sable graveleux; et pour empêcher les parois du tour des fouilles du draguage de s'ébouler, on les avait soutenues temporairement, et avant l'immersion des enrochements, par des fascinages en *saucissons bourrés de graviers.*

*Pont de Saint-Amand sur Sèvres*, terminé avant 1820, par M. l'Ingénieur Thénard.

Ce pont se compose de 5 arches en plein-cintre, d'environ 5 mètres d'ouverture; les piles de $1^m,25$ d'épaisseur ont été assises directement sur un sol graveleux. Mais des radiers en pierres de taille, appareillés en voûte renversée, s'étendent d'une pile à l'autre. Un énorme affouillement à l'aval de 7 mètres de profondeur sur 39 mètres de longueur à l'amont et à l'aval, avait déterminé la chute d'un ancien pont dans le même emplacement, et opposait de grandes difficultés à l'assiette du nouveau. On le combla avec les déblais et plâtras de l'ancien pont, en guise d'enrochements; et on recouvrit le remblai sur $9^m,20$ de longueur de l'amont à l'aval, et sur toute la largeur de la rivière, d'un avant-radier en piquets clayonnés, dont les cases furent remplies en pavage maçonné. La tête aval de cette plate-forme, ainsi faite, fut en outre défendue par un enrochement.

Enfin à l'amont, les têtes des radiers intercalaires aux piles, furent disposées en plan, suivant des arcs de cercle, garantis à l'amont par un clayonnage avec enrochement.

*Pont de Mélisey sur l'Ognon* (Haute-Saône), exécuté avant 1823 par M. l'Ingénieur Lacordaire.

Ce pont est formé de trois arches en arc de cercle de $11^m,20$ d'ouverture. Les piles et culées de $2^m,80$ et $5^m,10$ d'épaisseur moyenne, ont été fondées sur des couches d'empattement en béton de $0^m,75$ d'épaisseur, posées sur le sol graveleux et entourées de crèches de palplanches et pieux.

Comme l'Ognon est une rivière torrentielle, on a exécuté, mais à l'aval seulement et immédiatement après les têtes des piles de ce côté, une zône d'arrière-radier générale en pavage maçonné de $3^m,50$ de largeur, comprise entre deux files de pieux et palplanches. Cet arrière-radier repose aussi sur une couche de béton de $0^m,50$ d'épaisseur qui se lie à celle d'empattement des piles et culées. Cette couche présente en dessous une espèce de renfort ou nervure de $1^m,40$ de largeur et profondeur, qui s'enfonce dans le sol sur toute la largeur de la rivière en aval du pont.

*Pont de Saint-Girons, sur le Salat* (Arriége), exécuté avant 1820, par M. l'Ingénieur......

Ce pont, de 3 arches en arc de cercle, chacune de 14 mètres d'ouverture avec piles de 2 mètres, et culées de 6 mètres d'épaisseur, a été fondé directement sur le rocher. Comme les crues ordinaires ne s'élevaient qu'à $0^m,60$ au-dessus du niveau ordinaire des eaux, on a fait usage avec grande économie pour les fondations de batardeaux *amovibles*, dont les parois découpées par feuilles, s'assemblaient sur des semelles *traînantes*, fixées temporairement sur le sol. La même charpente de batardeaux a pu servir ainsi, successivement pour deux piles et deux culées.

*Pont de Monréjean sur la Garonne*, exécuté avant 1823, par M. l'Ingénieur Eudel.

Ce pont a été établi sur un fond graveleux et en un point du fleuve où les crues s'élèvent de 3 mètres au-dessus de l'étiage. Il se compose de 5 arches en arc de cercle de 12 mètres de largeur, et il a, en outre, sur les rives deux arches marinières de 5 mètres de largeur. Les piles et culées ont été fondées par batardeaux sur des pilotis, dont les intervalles ont été remplis en béton. Ce dernier est lui-même soutenu par une crèche de pieux et palplanches.

*Pont de Souillac sur la Dordogne*, exécuté par M. l'Ingénieur Vicat.

Ce pont a 7 arches de 22 mètres d'ouverture sur $8^m,33$ de montée; l'épaisseur uniforme de l'intrados à l'extrados est de $1^m,20$. La Dordogne à Souillac est une rivière torrentielle, sans aucun régime régulier; les crues s'élèvent à 5 et 6 mètres au-dessus de l'étiage, et alors la vitesse à la surface, dans le thalweg, est de 5 à 6 mètres par seconde. L'eau corrode aussi alors jusqu'aux aspérités du rocher, et met en mouvement les gros cailloux, provenant des corrosions antérieures.

Le fond du lit présente des nappes *tabulaires* et isolées de rocher, dont les intervalles jusqu'à 7 mètres de profondeur sont remplis de sable,

gravier et cailloux mélangés dans une foule de proportions. L'impossibilité de faire des épuisements de batardeaux, dans un roc criblé de trous et de fissures; les difficultés d'y faire tenir des pieux; déterminèrent à adopter pour essai le système de fondation des piles sur massifs de béton, à l'aide de caissons *non foncés*, et d'une enveloppe de défense en enrochements.

Les caissons furent composés de pieux jointifs, sabotés en fer. Le draguage préalable à l'immersion du béton fut très-difficile, à cause de l'irrégularité des reliefs du rocher, sous les terrains d'alluvions et de détritus.

Après avoir dénudé les parties saillantes du rocher, il restait à procurer une résistance à peu près uniforme aux intervalles qui les séparaient, et dont il n'eût pas été possible de retirer le gravier et le sable.

M. l'Ingénieur Vicat ayant remarqué que si un mélange de cailloux et de gravier était soumis à la percussion, les particules arrondies s'échappaient, et que cet inconvénient cessait quand on interposait des matières de dureté moyenne, à fragments anguleux, tels que le calcaire, recouvrit d'une couche de moellon de cette espèce et de $0^m,20$ à $0^m,30$ d'épaisseur, les lacunes entre les pointes de rocher; puis il fit battre successivement toutes les zônes par un mouton du poids de 650 kilogram. Le massif en béton de la fondation de chaque pile avait $6^m,20$ d'épaisseur, 4 mètres de hauteur et 15 mètres de longueur moyenne. On le chargea dix mois après l'immersion, d'un poids d'épreuve de 2500 tonnes, égal à celui d'une pile et d'une arche. Il n'en résulta qu'un tassement de $0^m,05$. Un autre massif âgé seulement de huit mois, tassa sous le même poids de $0^m,024$. Le poids d'épreuve consistait, au reste, en sable, gravier et cailloux tirés du fond de la rivière et contenus dans de grandes caisses.

Il arriva à l'une des piles, probablement par inégalité de résistance dans le fond, qu'au moment où la charge d'épreuve était aux $\frac{2}{3}$ ou à 1700 tonnes; le massif de béton âgé de dix mois s'inclina de l'amont à l'aval, en tournant tout d'une pièce, comme autour d'un axe horizontal qui eût été situé au tiers-aval de la longueur du massif. On ne put douter que l'*arrière*-bec de ce massif ne fût en suspens et détaché du fond.

Le poids d'épreuve ayant été augmenté, le béton se rompit en deux blocs; le plus petit à l'aval reprit son assiette; celui d'amont devenu libre s'abaissa de $0^m,015$, vers le point de fracture, et de $0^m,166$ à son extrémité amont. Ainsi divisé, le massif porta pendant huit mois un poids d'épreuve de 2554 tonnes, sans tassements ultérieurs.

Il fut décidé, pour remédier à cet accident, 1° qu'on souderait les deux

blocs, en refoulant du béton dans le joint de fracture; 2° qu'on encastrerait dans la première assise inférieure de la pile, une ceinture de fer forgé de $0^m,06$ en carré, pour suppléer à l'insuffisance possible de la soudure en béton; 3° qu'on réduirait la charge permanente, en élégissant les reins correspondants des deux demi-arches correspondantes.

M. Vicat a remarqué dans les voûtes de ce même pont, des mouvements périodiques qu'il a attribués à des différences de dilatation par la chaleur, dans les pierres des deux têtes du pont, les unes exposées au sud, et les autres au nord. M. Vicat en a conclu que les grandes voûtes soumises aux vicissitudes atmosphériques et aux changements brusques de température n'étaient jamais en équilibre.

*Pont de Waterloo ou du Strand sur la Tamise, à Londres*, exécuté par le célèbre Rennie avant 1816.

Ce pont dont la voie de $8^m,53$ de largeur pour voitures, a un trottoir de rive de $2^m,13$ de largeur, est de niveau et formé de neuf arches elliptiques de $36^m,57$ d'ouverture chacune, et de $10^m,66$ de montée. Les piles ont $6^m,09$ d'épaisseur à fleur d'eau et $9^m,14$ à la base; ce pont a été construit en pierres de granit blanc d'Écosse.

Les culées et les piles ont été fondées par batardeaux sur plates-formes de grillage et pilotis. La hauteur de l'eau à marée basse est de $3^m,10$ sous le pont; la Tamise, refoulée par la marée, monte de $3_m,35$ à $3^m,65$ et même jusqu'à 5 mètres dans les vives eaux.

Chaque pile pose sur 320 pilotis de $0^m,30$ de diamètre moyen, sur $5^m,05$ à $6^m,05$ de longueur; on compte un pieu par mètre quarré.

Afin de diminuer le poids que portent les piles, on a laissé dans les reins au-dessus de chacune des espaces vides qui se terminent en plan horizontal à la voie du pont. Des murs de briques *parallèles à la longueur* du pont, sont établis à égale distance dans ces vides intérieurs, et sont recouverts par des pierres plates qui supportent l'empierrement de la voie.

Pour augmenter la liaison des voussoirs avec les assises des piles, on avait soin, en posant chacun d'eux, de le battre au mouton contre les pierres déjà posées. Aussi, lors du décintrement, le point milieu ne s'est abaissé au plus que de 3 cent. 8.

Les matériaux de l'intérieur des piles, culées et voûtes sont d'un moindre volume, ont moins de résistance que les pierres de parement; mais n'étant pas exposés à l'action de l'air, ils conserveront leur force et leur solidité. Au contraire, les autres ponts de Londres, ceux de Westmin-

ster et de Blackfriars, étant parementés en pierre tendre, susceptible de se décomposer, ont souffert beaucoup de l'action du temps.

*Pont de Chester, sur le Dee, en Angleterre*, terminé en 1834 par l'ingénieur anglais Hartley.

Ce pont d'une seule arche de 60 mètres d'ouverture en arc de cercle; de 12 mètres de flèche, et sous lequel *peuvent passer des bâtiments mâtés*, a été fondé en grande partie sur le rocher. Toutefois, le terrain solide ayant manqué dans la zône arrière de la culée nord, on a été forcé pour l'atteindre de recourir à un pilotis. Le terrain qu'il y avait à traverser était si mou qu'un seule coup de mouton déterminait un enfoncement de $1^m$, 5 à 2 mètres. L'appareil de la voûte a été prolongé à travers les culées de manière à avoir ses naissances sur le terrain naturel dans lequel elles ont été encastrées par entailles. L'épaisseur de la voûte à la clef est de $1^m,20$; et les voussoirs ont 2 mètres de longueur aux naissances. Les reins de la voûte ont été élégis non comme d'ordinaire par des petites voûtes transversales à l'axe du pont, mais par des groupes de voûtes longitudinales dont la *hauteur verticale* diminuait progressivement depuis le parement des culées, et en remontant vers la clef. Les culées à travers lesquelles deux arches marinières ont été pratiquées, ne sont pas non plus massives. Entre les piédroits des arches et les piédroits des culées vers la rivière il existe trois contre-forts de jonction qui comprennent entre eux deux vides rectangulaires.

Pour éviter les épauffrures d'arête à l'intrados et à l'extrados, on a garni les voussoirs de *cales en plomb* dont l'épaisseur décroissant dans la longueur du joint, avait pour objet de satisfaire à tous les mouvements *articulatoires* de la voûte lors du décintrement.

Le cintre de cette voûte était fixe, et n'avait coûté que 72,500 fr.; il reposait sur des piliers à faux frais construits dans la largeur du débouché. Le tassement lors du décintrement n'a été à la clef que de $0^m,065$.

On s'est servi pour le levage des pierres, du treuil à engrenage mobile en fonte de fer usité aujourd'hui dans une foule de travaux. Ce treuil est muni de roulettes par lesquelles il glisse sur des chemins de fer, qui peuvent être transportés facilement eux-mêmes; en sorte que l'appareil peut fonctionner sur un point quelconque des zônes de travail.

*Pont sur la Dora, dans les faubourgs de Turin* (Piémont), terminé avant 1834 par M. Mosca, ingénieur piémontais.

Ce pont d'une seule arche en arc de cercle de $44^m,23$ d'ouverture sur

5$^{m}$,40 de flèche, a une surface droite de niveau; les deux têtes sont évidées par des *cornes de vache* analogues à celle du pont de Neuilly.

Les culées de 12 mètres d'épaisseur avec contre-forts en arrière de 6 mètres de longueur, ont été fondées sur grillage piloté. Le nombre des pieux de chaque culée a été de 470, dont 214 pour le massif proprement dit. Pour prévenir les épauffrures des arêtes lors du décintrement, la dernière arche a été divisée en trois zônes; dans la zône inférieure l'épaisseur des joints des voussoirs grossissait de l'intrados à l'extrados; dans la deuxième zône l'épaisseur était uniforme; dans la troisième, l'épaisseur grossissait de l'extrados à l'intrados. On s'est servi de cales en plomb et en tôle de fer pour produire ces variétés d'épaisseur.

On a pris d'ailleurs pour constater les effets du décintrement, les mêmes dispositions que celles qui avaient été employées en France au pont de Nogent sur-Seine, en 1769.

Avant cette opération, on a eu soin du reste d'enlever sur 6 centimètres de profondeur à l'intrados et l'extrados, tout le mortier des joints comme dernière précaution contre les épauffrures.

Vingt jours après la pose des clefs, le décintrement a été effectué; il a duré cinq jours, et au bout de ce temps le tassement était de 0$^{m}$,16; la clef est restée 0$^{m}$,106 plus haut que la cote des projets et tracés. M. l'Ingénieur *Mosca*, dans le but d'éviter des tassements pendant la pose des maçonneries des reins, corniches et parapets, a chargé la voûte uniformément d'un poids d'épreuve de près de 3000 tonnes qui est resté en place pendant quatre mois et n'a produit qu'un tassement de 0$^{m}$,04. La chappe au dessus de la voûte a été formée d'une première couche de *ciment bitumeux* de 0$^{m}$,15, battu jusqu'à ce qu'il fût durci; et d'une deuxième couche en pareille matière de 0$^{m}$,07 d'épaisseur, mais mélangée avec du gravier menu.

Ce travail a duré quatre ans.

On terminera les notions sommaires sur les ponts en maçonneries par le tableau des dépenses de construction de quelques grands ponts modernes.

*Tableau des dépenses de construction de quelques grands ponts en maçonnerie de divers âges.*

| DÉNOMINATION DES PONTS. | DATE de la construction. | NOMBRE D'ARCHES. | LARGEUR de la voie d'une tête à l'autre du pont. | LONGUEUR de la voie d'une culée à l'autre. | SURFACE A de la voie. | HAUTEUR moyenne de la voie du pont au-dessus du fond de la rivière. | PRODUIT B de cette hauteur par la surface A de la voie. | DÉPENSE totale à l'époque de la construction. | DÉPENSE par chaque mètre quarré des surfaces A. | DÉPENSE par chaque mètre cube des produits B. | OBSERVATIONS |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *En France.* | | | | | | | | | | | |
| Pont-Royal ou des Tuileries sur la Seine | 1632 | 5 arches de 22 mètres d'ouverture moyenne. | mèt. 17 | mèt. 130 | m.q. 2210 | mèt. 19 | m. c. 41.990 | liv. tour. 742 000 (*a*) | liv. tour. 335 (*a*) | liv. tour. 17,60 (*a*) | |
| Pont d'Orléans sur la Loire | 1760 | 9 arches de 30m,20 d'ouverture moyenne. | 15 | 343 | 5145 | 15 | 77.175 | liv. tour. 2.671.000 (*b*) | liv. tour. 519 (*b*) | liv. tour. 34,60 (*b*) | Tous les prix pour les époques de construction antérieures à 1790 devront, pour être comparables à ceux d'aujourd'hui, être forcés en raison de la dépréciation monétaire. Les prix (*a*) devraient probablement être triplés, et les prix (*b*) doublés. |
| Pont Bias de Trelport sur la Marne | 1760 | 3 arches de 24m,50 d'ouverture moyenne. | 9,75 | 88 | 858 | 14 | 12.012 | liv. tour. 489 000 (*b*) | liv. tour. 569 (*b*) | liv. tour. 40,60 | |
| Pont de Saumur sur la Loire | 1764 | 12 arches de 19m,50 d'ouverture moyenne. | 12,10 | 293 | 3545 | 15 | 53.175 | liv. tour. 586.100 (*b*) pour fondations seulement. | liv. tour. 230 (*b*) pour fondations seulement. | liv. tour. 15,30 (*b*) pour fondations seulement. | |
| Pont de Mantes sur la Seine | 1765 | 3 arches de 37 mètres d'ouverture moyenne. | 11 | 125 | 1375 | 18 | 24.750 | liv. tour. 612.000 (*b*) | liv. tour. 446 (*b*) | liv. tour. 24,70 (*b*) | |
| Pont de Neuilly sur la Seine | 1774 | 5 arches de 39 mètres, et 2 arches marinières dans les culées. | 14,60 | 226 | 3299,60 | 15 | 49.494 | liv. tour. 2.305.000 (*b*) | liv. tour. 6,8 (*b*) | liv. tour. 46,30 (*b*) | |
| Pont de Saint-Maxence sur l'Oise | 1784 | 3 arches de 23m,40. | 12,70 | 78 | 990,60 | 13 | 12.878 | liv. tour. 1.526.000 (*b*) | liv. tour. 1540 (*b*) | liv. tour. 219,00 (*b*) | |
| Pont de Louis XVI sur la Seine | 1791 | 5 arches en arc de cercle de 26 mètres d'ouverture. | 15,60 | 142 | 2215 | 12 | 26.580 | fr. 2.993.000 (*b*) | fr. 1351,00 (*b*) | fr. 112,00 (*b*) | |
| Pont de Frouart sur la Moselle | 1788 | 7 arches de 19m,50 d'ouverture. | 9,75 | 173 | 1686,75 | 10 | 16 867 | liv. tour. 440.000 (*b*) | liv. tour 261,00 (*b*) | liv. tour. 26,10 (*b*) | |
| Pont de Rouen sur la Seine | 1824 | 6 arches, dont 2 de 31 mètres au milieu, et 4 de 26 mèt. sur les rives. | 15 | 178 | 2670 | 23 | 61.410 | fr. 7.000.000 (*b*) y compris les abords. | fr. 2996,00 (*b*) | fr. 130,00 (*b*) | |
| *Ponts étrangers.* | | | | | | | | | *Id.* | *Id.* | |
| Pont de Blackfriars sur la Tamise, à Londres | 1769 | 1 arche de 30m,50 d'ouverture, et 8 de 21m,34. | 13,26 | 303 | 4017,80 | 16 | 64.284 | liv. tour. 3.800.000 (*b*) | liv. tour. 945,00 (*b*) | liv. tour. 59,00 (*b*) | |
| Pont de Waterloo sur la Tamise, à Londres | 1817 | 9 arches de 36m,60. | 12,80 | 387 | 8823,60 | 18 | 158.825 | fr. 25.000.000 y compris tous les abords. | fr. 2833.00 *Id.* | fr. 157,00 *Id.* | |
| Pont de Chester sur le Dee | 1834 | 1 arche de 60 mètres d'ouverture, et 12 m. de flèche. | 10 | 60 | 600 | 21 | 12.600 | 1.247.500 fr. 187 500 pour abords. 1.435.000 | fr. 2074 312,50 | fr. 98,70 14,90 | |
| Pont sur la Dora, près de Turin en Piémont | avant 1835 | 1 arche de 44m,24 sur 5m,40 de flèche. | 12 | 14,24 | 531 | 12 | 6.372 | fr. 1.400.000 | fr. 2636 | fr. 219,00 | |

*Viaducs, ponts et ponteeaux en bois.*

On peut classer en deux catégories les viaducs, ponts et ponceaux avec charpente en bois.

La première comprend ceux de ces ouvrages où le tablier de passage est seul en bois, et où les supports sont en maçonnerie, tantôt s'arrêtant à *l'origine de la charpente des tabliers*, tantôt s'élevant jusqu'au niveau de la voie du pont.

La deuxième comprend les viaducs, ponts et ponceaux où les piédroits qu'on nomme alors *palées* au lieu de *piles*, sont également en bois.

Dans la première catégorie, le tablier de passage en bois n'est quelquefois que provisoire, et en attendant l'exécution de voûtes en maçonnerie, ou d'arches métalliques; dans ce cas, les fondations et les maçonneries de support doivent évidemment être faites pour la destination définitive.

Mais si le tablier en bois est *définitif*, il est évident que la résistance des fondations et des piédroits peut être beaucoup moindre, et qu'elle n'a besoin que de correspondre au poids du tablier et à la charge maximum éventuelle, qu'on est convenu d'évaluer à raison de 200 kilog. par mètre quarré de *voie fréquentée*.

La préférence à donner à la première catégorie ci-dessus de viaducs et ponts en bois, sur les ponts entièrement en maçonnerie, tient à diverses causes : à des considérations de défense militaire; à des motifs d'économie dans la dépense initiale, surtout dans les fondations; à l'absence de pierres durables de grand échantillon pour voûtes en maçonnerie; à une rapidité obligatoire d'exécution plus grande; aux sujétions de la navigation, s'il s'agit de rivières à franchir; enfin l'on emploie souvent ce système mixte de construction, pour éviter les difficultés de voûtes biaises en maçonnerie.

Par des motifs en sens inverse, les ponts et viaducs en charpente ont quelquefois été construits avec piles en pierre plutôt qu'avec palées en bois, parce que ces dernières n'auraient pu opposer une résistance suffisante aux crues et débâcles d'un cours d'eau.

La deuxième catégorie de viaducs, ponts et ponceaux, a généralement un caractère précaire ou provisoire : toutefois les sujétions locales, surtout dans les matériaux disponibles, peuvent aussi en justifier l'emploi permanent.

On voit que le système de charpente des arches est commun aux deux

catégories, et ce qu'on dira sur ce système pour la première s'appliquera à la seconde.

*Première catégorie de ponts avec travées en charpente sur piles en maçonnerie.*

Les combinaisons de charpente qu'on peut adopter pour les travées d'un viaduc ou d'un pont; ou seront telles qu'elles n'exerceront aucune poussée contre leurs supports et pourront être considérées comme posées sur ces derniers; ou bien elles exerceront une poussée.

Dans le second cas se reproduit ce qu'on a dit pour les piles des viaducs et ponts en maçonnerie : on peut faire remplir à ces piles les fonctions de culées, ou seulement les envisager comme en équilibre sous des poussées opposées. Toutefois le premier mode paraît ici devoir être préféré, parce qu'il permet la réparation successive de chaque travée, et surtout parce que la charge éventuelle étant, dans ce cas, presque toujours supérieure à la charge permanente, il arrivera fréquemment qu'elle ne portera successivement que sur une travée en particulier.

Lorsque les charpentes des travées n'exerceront point de poussée, les dimensions des piles et culées pourront être réduites à celles de deux murs de support qu'on supposerait accolés ; c'est-à-dire pour des matériaux de moyenne dureté, à $1^m,50$ ou $1^m,70$.

On renvoie d'ailleurs aux leçons sur les fondations en général et sur les fondations des viaducs et ponts en particulier, pour les principes généraux de construction des culées et piles des ouvrages mixtes dont il vient d'être question.

Le nombre des travées à établir dans un viaduc ou pont en bois, dépend, comme pour les ponts en maçonnerie, d'une foule de considérations locales; mais ici il y en a une nouvelle toute spéciale.

Les voûtes en maçonnerie, bien exécutées, ont une durée indéfinie; il n'en est pas de même des travées en bois : il faut donc se ménager les moyens de réparer les diverses parties d'une travée. Or, cette condition sera d'autant plus difficile à remplir, que l'ouverture des travées sera plus grande. Les promptes altérations qu'éprouve le bois alternativement exposé à l'humidité et à la sécheresse, doivent faire placer les naissances d'une travée en *charpente plus haut*, toutes choses égales d'ailleurs, que celles d'une voûte en maçonnerie. L'énorme masse de ces dernières oppose d'ailleurs aux chocs des corps flottants et aux glaces, une résistance qui n'existe pas dans

les travées en bois. D'un autre côté, les travées en charpente comportent des flèches de montée moindres généralement que celles des voûtes en maçonnerie, et, dans quelques cas, se prêtent à des ouvertures d'arches bien plus grandes que dans ces dernières. Enfin, la nature et les dimensions des bois dans chaque localité doivent avoir une grande influence sur le choix de la combinaison de charpente à adopter, et par conséquent sur la largeur qu'il faut donner aux travées. C'est donc une question très-complexe que cette dernière fixation, et elle n'est susceptible d'aucune règle générale.

La largeur de la travée, ou de la voie d'un viaduc ou pont, et de ses trottoirs, est réglée d'après les mêmes considérations que dans les ponts en maçonnerie; il en est de même pour le dressement de niveau, ou en pente longitudinale de la voie charretière du pont.

Une travée quelconque se compose d'un certain nombre de fermes en charpente, sur lesquelles sont posés des *soliveaux transversaux*, recouverts d'un premier plan de madriers; sur ce plan on met tantôt une chaussée empierrée ou pavée, ou un deuxième plan de madriers qu'on nomme *faux plancher*, croisé avec le premier et exécuté en bois plus mince. C'est ce dernier qui est exposé directement aux roues et aux chevaux, et qu'on garnit souvent de pierrailles pour faciliter le passage de ces animaux. Composition des travées en charpente. Figures 233 des planches.

Les chaussées empierrées ou pavées, outre leur poids, ont l'inconvénient d'empêcher l'assèchement des parties supérieures de la charpente de la travée, et d'en hâter la pourriture.

L'emploi de *soliveaux intermédiaires*, entre le dessus des fermes et la plate-forme des planchers, permet d'espacer davantage les fermes, de parer aux irrégularités de pose et surtout assure par la ventilation, une plus grande durée aux bois.

On a employé avec succès le mastic bitumineux, saupoudré de menu sable argileux, pour les trottoirs des ponts en charpente réservés aux piétons.

Les fermes d'une travée se bornent quelquefois à deux, qui forment les têtes amont et aval, quand le viaduc ou pont n'a que la largeur nécessaire pour le passage d'une voiture; ou à trois quand ce passage est pour deux voitures. Ce petit nombre de fermes qui oppose de grandes difficultés aux réparations et renouvellements (à moins que par avance on n'en double le nombre sur chaque rive), n'avait été guère employé que pour des travées d'une grande ouverture, où *la charpente de chaque ferme s'élevait plus haut que la voie du viaduc ou pont.* Ponts avec simples fermes maîtresses de tête.

Palladio, en Italie, paraît être le premier qui ait cherché à donner aux

travées une grande ouverture, en mettant toutes les parties de la charpente des travées *beaucoup au-dessus des eaux*, et en leur faisant dépasser la voie du pont. Le pont de 33 mètres d'ouverture représenté fig. 234 des pl., a été construit sur le Cismone entre Trente et Bassano.

Figures 234 des planches.

On trouvera dans les œuvres de Gauthey et Krafft, des dessins et des descriptions de plusieurs grands ponts de ce genre, tels que ceux de Zurich, de Ritter de Wettingen, de Kandel et autres, qui ont duré plus de quarante ans sans renouvellements. Ce résultat a été dû probablement à la couverture d'abri, qui dans ces ponts était supportée par les maîtresses fermes de tête.

Figures 235 des planches

Ce système a été suivi, en France, pour le pont de la Pile, sur l'Ain, incendié en 1814 et reconstruit en 1818 sur le projet de M. l'Ingénieur Levaillant (fig. 236 des pl.).

Figures 236 des planches.

Les fermes sont au plus espacées à $3^m,50$ dans la même travée. Il est évident d'ailleurs, que la résistance des bois étant en simple raison de la largeur; il n'y a qu'un simple excédant de main-d'œuvre, à multiplier les fermes en les faisant plus minces, qu'à espacer beaucoup un petit nombre de fermes très-fortes. Dans le premier cas, les charges en dessus et en dessous sont mieux réparties; et ce qui est plus important, on n'a pas besoin de bois d'un aussi fort échantillon, et dès lors, on a plus de chances de les avoir sains et durables; enfin les réparations et renouvellements sont bien plus faciles.

Dans les viaducs qui appartiennent à un chemin de fer, il est évident d'ailleurs qu'il suffit de placer des fermes dans *les alignements* des diverses lignes de rails.

Composition des fermes des travées en charpente.

Tant que les travées n'ont que 4 à 5 mètres d'ouverture, de simples poutres ayant une forte dimension verticale suffisent pour les fermes. Mais au delà de 5 jusqu'à 15 mètres, et même plus loin, si les longueurs des bois le permettent, on peut former, ainsi qu'il a été dit à la leçon sur la résistance des bois, des assemblages ou des canevas rectangulaires ayant la même résistance qu'une poutre unique de la même hauteur qu'eux. On compose ces canevas de triangles, en y intercalant des pièces ayant pour objet, les unes d'empêcher l'écartement, les autres le rapprochement des deux poutres de rive haut et bas du canevas. On rendra les cadres encore plus résistants, si l'on y introduit, outre les pièces de bois qui seront comprimées ou tirées, des montants en fonte de fer et des tirants en fer forgé, susceptibles de raccourcissement à l'aide de vis de rappel.

Mais ces systèmes n'offrent pas toujours toute la rigidité désirable; et plus généralement pour les travées au delà de 5 mètres, et jusqu'à 15 ou

16 mètres, on emploie graduellement les dispositions suivantes pour les fermes des travées des ponts :

Poutres armées de contre-fiches vers leurs extrémités ;

Poutres avec sous-pontceaux et contre-fiches à leurs extrémités ;

Poutres avec sous-poutres au milieu de la portée; cette sous-poutre étant tenue par des contre-fiches; Figure 237 des planches.

Enfin, poutres avec sous-poutreaux aux extrémités, sous-poutres au milieu de la portée, contre-fiches et même moises pendantes pour empêcher la flexion des contre-fiches. Figures 238 des planches

On remarquera dans les figures 238 des planches le pont sur le Var, exécuté avec des bois ronds de mélèze simplement dégrossis.

Une disposition qu'il est important de ne pas négliger pour augmenter considérablement la résistance des fermes de tête, c'est de les relier aux parapets en bois ou en fer de la rive du pont par des tirants en fer verticaux, qui arrivent jusqu'à la main courante ou lisse supérieure du parapet; et de former ce parapet lui-même avec des montants et des croix de Saint-André.

Au delà de 15 à 16 mètres, il faut revenir aux canevas déjà décrits ci-dessus, ou aux systèmes de charpente triangulaire analogues aux ponts allemands déjà cités; ou arriver enfin à des cintres d'assemblage en arc de cercle, ou plein-cintre. Ces cintres seront du reste composés soit dans le système à la Philibert Delorme, soit dans ceux des ponts de Gauthey, de l'ingénieur allemand Wiebeking, et de M. le colonel Émy.

Le système de cet officier, déjà mentionné dans la leçon sur la *Résistance des bois* (figures 19 des planches) ne diffère des précédents, comme on le sait déjà, que parce qu'il substitue des planches minces et facilement flexibles, aux pièces équarries d'un fort échantillon, et forme ainsi une sorte de ressort élastique en bois. Il a été employé pour des ouvertures de 50 mètres dans de vastes combles d'édifices; mais sa grande hauteur se prêterait difficilement aux travées des ponts en charpente, et il est à craindre et surtout dans des ponts découverts, que la pourriture ne se développe rapidement dans les nombreuses surfaces du contact des lames de bois formant le cintre. Il serait difficile de les remplacer partiellement sans démonter les fermes elles-mêmes.

Dans le système des constructions allemandes, qui a été étendu jusqu'à des ouvertures de 119 mètres, les entraits horizontaux, ainsi qu'on a pu le voir par les figures 235, sont nécessairement composés de plusieurs pièces jumelées verticalement ou horizontalement, et entrelacées soit au moyen de dents pratiquées en sens opposés, soit plutôt par des dés

Système de charpente des travées de divers ponts d'Allemagne. cylindriques en bois ou en fonte, répartis en échiquier, et engagés dans des mortaises pratiquées dans les faces correspondantes des pièces à réunir (figures 16 des planches) comme dans les assemblages de mâts et de verges.

Le système des cintres d'assemblage, est raccordé (voir les œuvres de Gauthey, t. II), avec l'aire supérieure du pont par des moises pendantes dirigées suivant le rayon, ou mieux encore verticalement. Il a été employé jusqu'à 40 mètres d'ouverture avec flèche de 4 à 5 mètres, et les fermes des cintres, jusqu'au nombre de sept, avaient chacune jusqu'à 2 *mètres d'épaisseur dans le sens du rayon.*

Ce système très-surbaissé se lie assez bien aux grandes ouvertures dans les localités où *le niveau des crues est à une médiocre profondeur en contre-bas du sol de la route*; mais il partage avec celui de M. le colonel Emy, l'inconvénient d'exposer les bois à une détérioration anticipée, et de ne se prêter à aucunes réparations partielles.

M. Wiebeking, en Allemagne, a donné une grande extension au système des arches à grande ouverture avec fermes cintrées. Le pont de Bamberg (figures 239 des planches) a 72 mètres d'ouverture sur 5 mètres de flèche. La largeur du pont est de 9m,34. L'arche unique est composée de trois fermes; mais les fermes de côté sont doubles, probablement pour le cas de renouvellement de l'une d'elles; et celle du milieu est accompagnée de chaque côté par trois cours de pièces courbes, qui en forment une ferme triple. La hauteur du bois de chaque ferme est de plus de 2 mètres. Les pièces de chaque rang élémentaire du cintre sont des bois d'une grande longueur, pliés par des appareils suivant la courbure voulue, et dont il faut prévenir le redressement à l'aide de boulons et armatures en fer.

Figures 239 des planches.

On remarque au pont de Freising, de deux arches chacune de 46 mètres d'ouverture (figures 240 des planches), que la charge des planchers est transmise aux fermes cintrées par des *piles transversales* de pièces superposées les unes aux autres.

Figures 240 des planches.

La plupart de ces ponts de grande dimension ont été exécutés en Bavière de 1807 à 1809, et ont donné passage aux plus fortes voitures de roulage Mais ce système, qui a les inconvénients signalés plus haut dans les fermes cintrées en général, de plus exige des bois de grande dimension qu'on ne rencontre plus en France; et l'opération par lesquels on les plie doit, dès l'origine, altérer gravement leur élasticité, et hâter la déformation des fermes.

Le tableau ci-dessous donne les dimensions principales des ponts exécutés en Allemagne d'après le système de M. Wiebeking.

*Tableau des principales dimensions des ponts en bois construits ou projetés en Allemagne par M. Wiebeking.*

| INDICATION DES PONTS. | Largeur des ponts. | Longueur de la voie. | Ouverture des arches. | Plus grand rayon des cintres. | Flèche des cintres après le tassement. | Rapport de l'ouverture à la flèche. | Longueur des courbes les plus longues. | Équarrissage des courbes. | Flèche des courbes. | Rapport de la longueur des courbes à leur flèche. | Distance des entretoises de milieu en milieu. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | mèt | mèt. | mèt | mèt. | mèt | mèt. | mèt | mètres. | mèt. | mèt. | mèt. |
| Pont de Munich, projeté. . . . . . . | 11,68 | 101,00 | 83,49 | 195,61 | 5,84 | 14,30 | . . . | 0,364 à 0,389 | . . . | . . . | 3,50 |
| Pont de Bamberg, bâti en 1809 sur la Regnitz. . . . . . . . . . . . . . | 9,34 | 71,81 | 62,76 | 127,46 | 5,11 | 12,50 | 16,05 | 0,340 0,389 | 0,316 | 50,80 | 3,95 |
| Pont de Scharding, bâti de 1808 à 1809 sur la Rott . . . . . . . . . . . | 7,59 | 78,81 | 58,38 | 77,72 | 5,69 | 10,26 | 18,97 | 0,316 0,389 | 0,510 | 37,14 | 4,79 |
| Pont de Freysing, bâti en 1807 et 1808 sur l'Isar, brûlé en 1809. . . . . . | 7,59 | 108,00 | 46,41 | 78,64 | 3,50 | 13,25 | 14,01 | 0,316 0,364 | 0,437 | 32,00 | 5,84 |
| Pont d'Ausbourg, sur le Lech, bâti en 1807 et 1808. . . . . . . . . . . | 7,64 | 113,55 | 34,44 | 47,81 | 3,21 | 10,72 | 12,51 | 0,316 0,364 | 0,486 | 23,28 | 5,70 |
| Pont d'Ettringen, sur le Wertach, bâti en 1808 et 1809 . . . . . . . | 7,59 | 52,83 | 42,03 | 92,45 | 2,41 | 17,46 | 13,87 | 0,316 0,389 | 0,535 | 26,20 | 3,50 |
| Fermes diagonales de ce pont. . . . . | . . . | . . . . | 49,33 | 106,58 | | | | | | | |
| Pont d'Irsingen, sur le Wertach, bâti en 1808 . . . . . . . . . . . . . | 7,59 | 45,54 | 37,95 | 86,19 | 2,12 | 17,91 | 14,60 | 0,291 0,364 | 0,486 | 30,00 | 4,67 |
| Pont de Neuœtingen, sur l'Inn, bâti en 1807, et brûlé en 1809. . . . . | 7,59 | 172,51 | 31,23 | 60,72 | 2,04 | 15,29 | 17,81 | 0,316 0,364 | 0,729 | 24,40 | 5,25 |
| Pont de Vilshofen, sur le Vils, bâti en 1809. . . . . . . . . . . . . . | 8,17 | 65,68 | 54,00 | 114,20 | 3,36 | 16,09 | 11,68 | 0,340 0,389 | 0,364 | 30,00 | 3,50 |
| Pont d'Altenmarkt, sur l'Als, bâti en 1809. . . . . . . . . . . . . . | 8,17 | 55,17 | 40,97 | 59,09 | 3,89 | 10,96 | 11,68 | 0,243 | 0,364 | 30,00 | 2,38 |

Les divers systèmes ci-dessus dépensent tous beaucoup de fer pour les boulons et armatures de liaison, et de fonte pour les entrelacements des divers plans de bois. Leurs naissances exigent les plus grandes précautions contre la pénétration des fibres des bois, contre les chocs et la pourriture. Ordinairement on assemble les abouts des cintres sur des poteaux inclinés en bois, ou mieux encore sur des plaques en fonte de fer.

On peut voir, au reste, dans l'ouvrage de Gauthey, et mieux encore dans le *Résumé des leçons sur la résistance des matériaux* de M. Navier, et dans la note insérée par lui dans les *Annales des ponts et chaussées* de 1831, le mode de calcul de la résistance des canevas de charpente et des cintres en charpente, des poussées qu'ils peuvent exercer contre leurs appuis; et des flèches qu'ils peuvent prendre sous la charge maximum permanente et éventuelle, flèches dont il faut tenir compte dans la confection et la pose, afin que la surface de la voie du pont ne présente jamais de creux au milieu des travées.

D'après Wiebeking, cette flèche est donnée par la formule $z = 0{,}02\,\frac{h}{e}$, où $e$ est l'ouverture de l'arche en mètres, et $h$ la flèche du cintre.

On sait déjà qu'une pièce cintrée, placée entre deux culées fixes, ne prend, sous un poids donné, que le tiers de la flèche qu'elle prendrait si elle était redressée et posée librement sur ses appuis.

Dans toutes les travées d'une ouverture au delà de 15 à 20 mètres, la pénétration des bois qui se rencontrent doit être au reste évitée par l'interposition de lames ou même d'armatures en fer ou en fonte.

Figures 241 des planches.

Dans un pont de 103 mètres d'ouverture d'arche, appelé le Colossus, et exécuté à Philadelphie, aux États-Unis, toutes les pièces sont ainsi garnies de cales, liées par des armatures en fer, et il n'existe de tenons et mortaises que dans les parties supérieures. C'est en effet par les assemblages que commence la pourriture des parties inférieures des charpentes. On a visiblement cherché à imiter dans cet ouvrage, l'appareil des voussoirs d'une voûte en pierre, en composant chacun des voussoirs d'un canevas *invariable en bois*.

Toutes les pièces de bois de ce pont avaient été mises à nu jusqu'au cœur du bois et triées. Elles sont partout séparées les unes des autres par des armatures en fer, liées par des boulons à écrous, qu'on peut resserrer à volonté si quelque partie venait à s'ébranler. Chaque pièce peut d'ailleurs être remplacée sans porter atteinte à la solidité du reste de la construction. Toutefois, le système de charpente de ce pont exerce une poussée considérable sur les supports. Elle n'existe pas dans le pont de *Newhope*, également construit aux États-Unis, et représenté également dans les figures 241 des planches. Les poutres de support du plancher y fonctionnent comme entraits, et sont rattachées par des boîtes en fonte aux naissances des arcs.

Nouveau système de charpente imaginé aux États-Unis par M. Town.

M. le major Poussin a signalé, dans son ouvrage sur les travaux publics des États-Unis, un nouveau système de charpente imaginé par M. Town, et qui paraît avoir rempli la plupart des conditions de ce genre d'ouvrages. En effet, ainsi que M. le major Poussin le fait observer, dans ce système :

Figures 242 des planches.

1° Il n'y a aucune poussée contre les piles et culées dont les dimensions sont ainsi restreintes à leur minimum ;

2° L'action des charges agit toujours dans le sens des fibres du bois; et le remplacement des tenons et mortaises d'assemblage par des gournables empêche les mauvais effets de la pénétration des bois;

3° Le débouché au-dessus du niveau des eaux, est partout de la même hauteur sur toute la longueur du pont; et il serait facile de disposer la construction de manière à ce qu'elle eût une zône de tablier mobile pour le passage des bâtiments à voile;

4° L'action des charges est répartie sur un grand nombre d'éléments, et offre ainsi plus de garanties de résistance et de durée;

5° Ce système s'adapte à toutes les grandeurs de débouchés, avec plus d'économie qu'aucun des autres systèmes suivis jusqu'à présent;

6° Il ne se compose que de matériaux qu'on peut se procurer partout à bon marché; et le remplacement d'une pièce isolée s'y fait avec la plus grande facilité;

7° Enfin il offre, comme les ponts *allemands*, aux voyageurs et aux marchandises un abri, qui défend en même temps la charpente des ponts eux-mêmes contre les intempéries des saisons.

M. le major Poussin ajoute que, pour toute ouverture au-dessous de 40 mètres, on peut, dans le canevas des maitresses-fermes, se restreindre, comme il est indiqué dans les figures 243 des planches, à deux cours de ventrières longitudinales, l'une au haut, l'autre au bas; mais qu'au delà de 40 mètres il serait prudent de les doubler comme il est indiqué (figures 244 des planches).

Figures 243 et 244 des planches.

On manque encore, du reste, de données pour comparer la durée de ces nouvelles travées en bois à celle des travées des divers systèmes exécutés jusqu'à ce jour.

Liaisons des fermes de la même travée en charpente.

Quelle que soit l'ouverture des travées et la combinaison des bois dans les fermes de la même travée, il est essentiel que toutes ces fermes s'entr'aident et concourent à la résistance, soit dans le sens vertical, soit dans le sens horizontal. Ainsi, les soliveaux des travées, s'ils portent directement sur les fermes, ou, à leur défaut des groupes spéciaux et multipliés *de moises* transversales devront s'entailler au droit de chaque ferme, et se lier avec elles par des boulons. Ces entailles, dont on peut varier la profondeur, donnent en outre le moyen d'éviter des déchets considérables de bois, et d'employer le bois équarri tel qu'il vient des forêts, c'est-à-dire avec la forme de pyramide quadrangulaire tronquée, dont les dimensions au petit bout sont généralement de $\frac{1}{5}$ à $\frac{1}{6}$ plus faibles qu'au gros bout.

Dans les travées d'une ouverture plus grande que 10 à 12 mètres, les fermes d'une même travée, liées comme il vient d'être dit, n'offriraient qu'une faible résistance contre les ouragans, les eaux, les glaces et les

corps flottants, si on ne les arcboutait par des pièces en diagonales qu'on nomme *contrevents*, qui sont les unes en bois, les autres en fer forgé, et dont le canevas en plan doit présenter un réseau de triangles intercalaires aux fermes. Ce réseau doit être plus serré vers le milieu des travées que vers leurs naissances. Les figures 245 des planches indiquent la disposition de contrevents faite par M. l'Ingénieur Emmery au pont d'Ivry.

Figures 245 des planches.

Quelquefois même on allonge les culées et les piles pour pouvoir disposer contre les fermes de tête des travées, des demi-fermes qui se placent obliquement aux têtes de pont, et forment comme des *etrésillonnages latéraux*.

Mais, dans ce cas, il importe de remarquer que pour les piles, les demi-fermes de deux travées adjacentes produisent une poussée, dont la résultante tend à détacher les extrémités du corps de la pile, et qu'il faut y pourvoir par des liaisons ou ceintures en bois ou en fer.

Levage des ponts en charpente.

Dans les travées formées de simples poutres, ou de poutres armées de sous-poutres, contre-fiches et moises pendantes, la pose se fait pour chaque ferme par parties, et à l'aide d'échafaudages ou suspendus ou portés par des embarcations amarrées contre le courant.

Mais si les fermes sont des arcs à la Philibert Delorme, ou dans le système du colonel Émy, le levage se fait en masse, après avoir relié entre eux les deux côtés de la ferme par des *planches d'ouverture à faux frais*. Cette opération s'exécute par des *mâts de charge* avec poulies (dites palans), renforcés au besoin de treuils ou cabestans; et ces appareils eux-mêmes sont supportés, soit par des ponts de service temporaires, submersibles ou insubmersibles, soit par des bâteaux, chalands, radeaux d'eau liés entre eux et amarrés contre le courant.

Dans le système de charpente de Wiebeking, la confection des fermes se fait en quelque sorte dans le levage lui-même, ainsi qu'on peut le lire dans le traité de Gauthey, et c'est là un des inconvénients principaux de ce système.

Notice sur le pont de Besons sur la Seine.

L'historique sommaire des accidents éprouvés par le pont de Besons sur la Seine, et publié par M. Jollois, Ingénieur en chef des ponts et chaussées, complétera ce qui est relatif à la première catégorie des viaducs et ponts en bois avec piles et culées en pierres.

Ce pont est formé de sept arches de 20 mètres d'ouverture sur une largeur de voie de 7 mètres; cette voie est à $12^{m},0$ au-dessus du fond du lit de la rivière; de là des remblais très-élevés aux abords; mais leur poussée avait semblé devoir être équilibrée par les culées, et par la poussée

Figures 246 des planches.

contraire des arcs en charpente; toutefois, ce pont était à peine achevé en 1811, que des lézardes se manifestèrent aux angles d'épaulement des murs de culées avec les corps carrés des culées des deux rives, et l'on s'aperçut que les deux murs de culées qui avaient été fondés sur pilotis s'avançaient en rivière, et que les pilotis eux-mêmes surplombaient dans le même sens. Par suite, les fermes cintrées en charpente refoulées ainsi à leurs naissances, gonflèrent à leur sommet et relevèrent la voie du pont des deux arches extrêmes. On attribua ces effets à plusieurs causes : à la fiche trop courte des pieux; à la trop grande hauteur de leurs têtes au-dessus du fond de la rivière; au remblaiement prématuré des terres en arrière des maçonneries encore fraîches des culées; enfin à des affouillements qui avaient eu lieu dans le lit de la rivière et sous les arches extrêmes.

Après avoir vainement essayé d'arrêter les mouvements 1° en enlevant les remblais, et en les remplaçant par des contre-murs en pierres sèches adossés aux culées ; 2° en formant sous les arches extrêmes un radier général en enrochements; on prit le parti d'adosser contre le parement des culées un chemin de halage dont le mur de soutènement fondé par caissons, et lié aux culées par des *contre-forts équidistants en arc de cercle*, devait former une ceinture d'enveloppe des zônes inférieures des culées; on se résignait d'ailleurs à la démolition des parties supérieures. Cette disposition indiquée aux fig. 246 des planches a eu un entier succès.

Il était utile de faire disparaître le surhaussement du sommet des fermes cintrées. Pour y parvenir il fallut soutenir ces fermes pendant qu'on dégageait les maçonneries des culées où leurs naissances étaient engagées. On se servit à cet effet de verrins (grandes vis en bois) qu'on établit sur une plateforme portée par un pilotis à faux frais. Les verrins avaient un écrou commun dont la longueur était égale à la largeur de la voie du pont, en sorte que les mouvements d'abaissement étaient uniformes sur toute cette largeur.

L'ouvrage publié par M. l'Ingénieur en chef Emmery, sur la *Construction du pont en bois avec piles et culées en maçonnerie d'Ivry sur la Seine*, est un véritable manuel pour ce genre d'ouvrages, et on y renvoie pour tous les détails d'exécution.

Ce pont est formé de cinq arches de $22^{m},25$ d'ouverture moyenne, a une longueur totale de $122^{m},25$ entre les culées, et une largeur de voie de $9^{m},25$ et par conséquent une surface de voie de 1131 mètres quarrés. Cette voie est à 13 mètres au-dessus du fond de la rivière, en sorte que le volume de l'espace occupé par le pont est de $14703^{m.c.}$.

| | |
|---|---|
| La dépense s'est élevée, y compris les abords et travaux annexes à. . . . . . . . . . . . | 795,000 f. |
| Ce qui fait ressortir le mètre carré de voie, à | 703 |
| Et le mèt. cube de volume total d'espace à | 54 |

*Deuxième catégorie de viaducs, ponts et ponceaux en bois.*

Il ne reste à décrire ici que ce qui est relatif aux culées et palées en bois.

Culées en bois des ponts en charpente.

Les culées ont toujours à résister à la poussée des terres, et quelquefois à celle des travées; mais les points d'application de ces deux genres de poussées ne sont jamais à une distance telle qu'elles puissent déterminer une tendance à la rotation. Dans les travées de petite ouverture, la poussée des terres sera généralement prédominante; le contraire aura lieu dans les travées de grande ouverture. Un système transversal d'assemblages triangulaires verticaux correspondant à l'aboutissement des diverses fermes, et bordé du côté des terres, serait convenable dans les deux cas. Il serait analogue à celui qui a été indiqué pour les batardeaux (figures 220 des planches).

Figures 220 des planches.

Mais le terrain pourrait être trop résistant pour que ce système pût y être enraciné par le bas comme pilotis, ou trop mou pour offrir une résistance latérale suffisante. Dans le premier cas, on lie les fermes verticales de la culée au terrain, en les y encastrant par leur semelle inférieure, et en leur adossant en arrière une maçonnerie de gros blocs posés à sec. Dans le deuxième cas, on aurait recours aux moyens déjà indiqués pour les fondations des viaducs ou ponts en maçonnerie.

Souvent à cause de la détérioration plus rapide dans les culées en bois que dans les palées, on leur substitue des perrés de revêtement de rive, sauf à espacer les palées de manière que la portée des poutres du pont, depuis le haut des perrés jusqu'aux premières palées vers chaque rive, ne soit pas disproportionnée avec leur résistance.

Palées en bois.

Les palées sont ordinairement formées en hauteur de deux parties, l'une inférieure qui est engagée dans le terrain et qu'on nomme *basse palée*, et l'autre supérieure, qui s'appuie sur la précédente, reçoit les abouts des fermes de la travée, et s'élève jusqu'au dessous de la voie du viaduc ou du pont.

Figures 247 des planches.

Dans les terrains qui se refusent à la fiche des pieux, il n'y a point de

pieux de basse palée; et si l'on possède des bois de grande longueur, le même pieu sert dans la basse et la haute palée; cependant l'inégale durée des bois sous l'eau et en terre, et de ceux qui sont exposés aux vicissitudes atmosphériques oblige, lors des réparations, à la subdivision indiquée ci-dessus.

Si les palées doivent être établies sur le rocher, et que l'on ne veuille ou ne puisse pas les encastrer, il est nécessaire de retenir leur pied soit par un bétonnage, soit par des enrochements.

Si les palées doivent résister à la poussée des travées et former culées, il faudra, dans la plupart des cas, avoir au moins deux rangées de poteaux par haute palée dans le sens de leur largeur, et relier les poteaux correspondants d'une rangée à l'autre par des croix de Saint-André. Les poteaux de hautes palées d'une même rangée sont coiffés d'un chapeau, et sont engagés par leur pied dans des semelles posées sur les chapeaux des pieux de basse palée, et entaillées avec ces derniers. Figures 248 des planches.

Les pieux de basse palée sont au moins en même nombre que ceux de haute palée; mais, suivant la nature du terrain, et l'espèce de refus auquel le battage conduira, il y aura souvent deux ou trois rangées de pieux de basse palée, pour une rangée de poteaux de haute palée. Figures 249 des planches

Tout ce qu'on a dit plus haut pour la tenue des pilots de fondations de viaducs et ponts en maçonnerie, s'applique d'ailleurs ici; seulement, à raison de la moindre valeur des viaducs et ponts en charpente, et des considérations d'économie qui auront fait adopter ce genre d'ouvrages, on substituera des enrochements, ou des fascinages entremêlés de couches de blocaille aux bétonnages autour des fondations. L'on recouvrira même au besoin le lit de la rivière de menus enrochements, de fascinages, ou de plates-formes en bois, si l'on craint les corrosions et les affouillements. Figures 250 des planches

Les hautes palées pour résister aux glaces et aux corps flottants, si elles ne sont pas défendues en amont par des brise-glaces isolés et spéciaux, doivent présenter des arêtes saillantes et tranchantes, comme il est indiqué fig. 247 des planches. Brise-glaces

Mais, de plus, pour empêcher les poteaux des hautes palées de s'incliner parallèlement entre eux de l'amont à l'aval, il est utile (voir la même figure 247) de les croiser dans le plan vertical de chaque rangée par des pièces diagonales, dirigées en montant de l'aval à l'amont et entaillées au droit de chaque poteau montant.

Les brise-glaces détachés qu'on place en avant des palées, se composent :

ou d'un simple plan de bois vertical placé dans le fil de l'eau, terminé du côté amont par une arête en biseau inclinée de 30 à 45° sur la verticale, ou d'une pyramide triangulaire aiguë, dont une des arêtes est placée dans le sens du fil de l'eau, avec la même inclinaison de 30 à 45° de l'amont vers l'aval. Le patin de la pyramide est tenu au reste comme les palées.

Figures 251 des planches.

Les dimensions de toutes les pièces de basse palée, haute palée, travée, etc., doivent d'ailleurs être calculées, d'après le maximum des charges correspondantes, dans l'hypothèse des éventualités les plus défavorables et suivant les règles indiquées à la leçon sur la résistance des bois.

Dépense de construction des ponts avec piles en bois.

La dépense de construction des ponts avec palées en bois, dépend, comme celle des ponts en maçonnerie, d'une foule d'éléments qui varient d'une localité à l'autre. Les culées et leurs abords étant les mêmes, quelle que soit la longueur du pont, il en résulte que, toutes choses étant égales d'ailleurs, les ponts de grande longueur devront moins coûter par mètre courant que ceux d'une petite longueur.

Les trottoirs et parapets des deux rives de la voie seront aussi un article de dépense indépendant de la largeur de cette voie, ce qui doit dès lors rendre, toutes choses aussi égales d'ailleurs, les ponts les plus larges moins coûteux par mètre courant de largeur de voie que les ponts étroits.

Des passerelles avec culées et palées en bois, fondées sur pilotis dans des terrains vaseux, de 85 mètres de longueur sur 3 mètres de largeur de voie, et par conséquent de 255 mètres quarrés de surface de voie, où cette voie était à 5 mètres au-dessus du fond des eaux, ont coûté 18.000 fr.

| | |
|---|---|
| Ce qui fait reporter le mètre courant de voie à. . . . . . . . . . | 211 fr. |
| Le mètre quarré à . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . | 70 |
| Le mètre cube de l'espace occupé par le pont à . . . . . . . . . | 14 |

Un grand pont en bois, de 22 travées de 12 mètres chacune, avec palées en bois et culées en maçonnerie, fondé sur pilotis, dont tous les bois étaient en sapin du Nord, a coûté :

| | |
|---|---|
| Pour les deux culées et leurs abords. . . . . . . . . . . . . . | 61.120 fr. |
| Pour chaque palée avec brise-glace 2.576 fr., et pour les 21 . | 53.256 |
| Pour chaque travée. . . . . . . . 6.815 fr., et pour les 22 . | 149.930 |
| Total . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . | 264.306 |

Si les culées avaient été seulement en bois ou en perrés, la dépense se serait réduite à 219.000 fr.

Ce pont a 264 mètres de longueur totale, $7^m,50$ de largeur de voie, et par conséquent 1.980 mètres quarrés de surface de voie; cette voie est à 8 mètres au-dessus du fond de la rivière, en sorte que le volume de l'espace occupé par le pont est de 15.840 mc.

| | Avec culées en pierres. | Avec culées en bois. |
|---|---|---|
| Le prix du mètre courant de voie ressort donc à | 1.000 fr. | 795 fr. |
| Celui du mètre quarré de surface de voie à. . | 133 | 906 |
| Celui du mètre cube d'espace à. . . . . . . . . | 16,6 | 13,2 |

### *Viaducs et ponts fixes en fer.*

Les viaducs et ponts fixes en fer exécutés jusqu'à ce jour, ont été, comme les viaducs et ponts en charpente de la première catégorie, appuyés sur des culées et piles en maçonnerie, tantôt s'élevant jusqu'au niveau de l'aire du pont, tantôt s'arrêtant aux naissances des travées métalliques.

L'ajustage et la pose d'arches métalliques et surtout leurs réparations, exigent des ouvriers habiles qu'on ne trouve guère que dans les grandes villes ou dans les grands chantiers et usines métallurgiques.

L'usage de ces ponts, indépendamment de leur prix élevé, et malgré leur poids généralement moindre que celui des arches en maçonnerie, sera donc limité à un petit nombre de localités. D'ailleurs les viaducs et ponts suspendus, qui sont d'une confection bien plus simple, dans lesquels on peut vérifier facilement la résistance de chaque pièce avant l'emploi, dont le montage n'exige pas une grande habileté technique, ont de plus le grand avantage de franchir de grands intervalles, d'économiser considérablement sur les dépenses de fondations des piles, et y joignent pour les ponts proprement dits, celui de ne pas gêner la navigation.

La rouille et même la décomposition interne que la fonte semble éprouver par un long séjour dans l'eau, surtout dans l'eau *saumâtre* doivent, indépendamment de son prix élevé, la faire rejeter pour les culées et piles des ponts à tablier métallique.

Les principes généraux qu'on a indiqués pour les fondations des piles et culées, et leurs dimensions dans les ponts en maçonnerie et bois, s'appliquent ici.

L'ouverture et la flèche des travées, le nombre de ces dernières, dépendent, comme pour les viaducs et ponts en maçonnerie et en bois, d'une foule de considérations qui excluent toute règle générale. Dans le petit

nombre des ponts de ce genre qui ont été exécutés, il se trouve des travées qui ont jusqu'à 80 mètres d'ouverture et 5 mètres de flèche.

Seulement ici, comme dans les ponts en bois, il paraît convenable de placer les naissances des travées au moins au-dessus du niveau des eaux ordinaires.

Tout ce qui a été dit sur la largeur et les dispositions de la voie charretière pour les viaducs et ponts en maçonnerie et en charpente, et particulièrement pour les viaducs de chemin en fer s'applique ici également.

Avantages et inconvenients de la fonte de fer et du fer forgé pour les viaducs et ponts métalliques.

Les systèmes à employer pour les travées métalliques reposent sur les propriétés de la fonte et du fer forgé, qui ont quelques analogies avec celles de la pierre et du bois. La fonte présente, comme la pierre, une grande résistance aux efforts qui tendent à l'écraser; le fer forgé résiste, comme le bois, à des efforts qui tendent à en allonger les fibres.

La fonte, par la fusion, se prête mieux que toute autre espèce de matériaux, aux formes les plus convenables pour la résistance; mais les difficultés de moulage, de fusion homogène, ne permettent pas d'obtenir sans grande dépense des pièces élémentaires ayant plus de 8 à 9 mèt. de longueur et de plus de 3 à 4000 kg. de poids. La fonte brute mal dosée, ou mise en contact avec du charbon de mauvaise qualité, peut produire de la fonte *moulée* cassante et inattaquable au burin; enfin l'inégalité de retrait ou d'allongement par les variations de la température, et les chocs, peuvent déterminer des ruptures brusques très-dangereuses.

D'un autre côté, le fer forgé, qui présente une multitude de variétés de qualité, ne peut fournir des pièces d'une grande section transversale, par exemple de plus de 64 centimètres carrés, ni d'une grande longueur par exemple de 8 à 10 mètres, que par des corroyages et des soudures très-coûteux, et d'une exécution quelquefois imparfaite.

Des canevas en fer forgé exigent de nombreux assemblages, que la dureté du métal rend très-difficiles à ajuster avec précision.

Pour réduire, autant que possible, les dépenses de confection et le poids d'une travée métallique, il faut donc que la fonte et le fer y soient employés dans les conditions de leur maximum de résistance et de durée, et ne soient pas projetés sur des dimensions en dehors des moyens ordinaires de l'industrie. Il faut surtout qu'ils se composent, autant que possible, d'*éléments entièrement semblables*, afin que le même travail se reproduisant un grand nombre de fois, soit effectué avec la précision et l'uniformité

qu'on n'obtient qu'avec des machines, ou que par une répétition continuelle et spéciale des mains-d'œuvre faites par des hommes.

Il résulte de ces considérations : que dans l'exécution des ponts fixes en fer, l'art du fondeur et celui de l'ouvrier en fer doivent servir presque exclusivement de guides, et que dans les contrées, comme la France où les métaux sont à un prix fort élevé, et où les ouvriers habiles ne sont pas encore très-répandus, ce genre d'ouvrages sera peu employé.

C'est en vue de ces conditions que les travées de tous les ponts métalliques exécutés jusqu'à ce jour sont disposées dans leurs parements de dessous en demi-cercles ou arcs de cercles plus ou moins surbaissés. D'ailleurs on sait qu'une pièce courbe porte, avant de fléchir, une charge triple de celle qu'elle porterait si elle était droite, et avec la même portée.

La voie de travée, suivant les besoins de la circulation, est disposée pour un seul passage de voitures, ou pour deux, tantôt sans trottoir, tantôt avec un ou deux trottoirs. Afin de diminuer les effets de la trépidation et des chocs dans le passage des voitures ou des hommes, cette voie doit être séparée des parties métalliques par des plates-formes élastiques en bois. Aussi, dans la plupart des ponts, la chaussée est portée par des madriers en bois, fixés sur des pièces transversales, en bois, fonte ou fer forgé qui portent elles-mêmes sur les fermes métalliques des travées.

On s'était préoccupé beaucoup dans les premiers ponts fixes en fer, des effets des changements de température sur la fonte et le fer forgé. D'après les calculs de Gauthey, dans le *Traité de construction des ponts* (v. 2), une ferme de 80 mètres d'ouverture sur un rayon de courbure de 80 mètres, et une hauteur métallique de 2 mètres dans le sens du rayon, n'aurait éprouvé que $1^{\text{mill.}},16$ de différence entre les dilatations linéaires de l'intrados à l'extrados, et par une différence totale de température de 40° de Réaumur.

Au Pont de Southwark, l'Ingénieur Rennie avait observé que le sommet de chaque arche de 64 mètres d'ouverture, se relevait de $0^{\text{m}},007$ par chaque augmentation de 10° de chaleur du thermomètre de *Farenheit*; en sorte que, par une élévation totale de 90° de température à ce thermomètre, le surhaussement de l'arche n'eût été que de $0^{\text{m}},07$.

Description succincte de quelques grands ponts métalliques.

Figures 252 des planches.

Dans les premiers ponts en fer, comme celui de Coal-Brookdale en Angleterre, et le Pont-des-Arts, en France, l'on a composé les formes des travées de plusieurs grands arcs en fonte concentriques, tenus à distance au-dessus les uns des autres par des petites colonnes en fonte, dans le sens

du rayon. Ces colonnes portent la charge des pièces du plancher, laquelle leur est transmise dans les reins de voûtes par des montants en fonte, ou par des anneaux intercalaires de différents diamètres, tangents à la fois entre eux; aux grands arcs du cintre, et au-dessous du plan de bois de la voie du pont. Ce remplissage avait en outre pour objet d'empêcher le cintre de se relever dans les reins quand *la charge mobile arrivait au sommet.*

On voit que dans ce système la fonte des arcs ne travaille pas dans les meilleures conditions de résistance.

Figures 253, 254, 255 des planches. Dans les ponts subséquents de Sunderland (fig. 253 des pl.); de Stains, en Angleterre (fig. 254 des pl.), et d'Austerlitz à Paris (fig. 255 des pl.), l'on a décomposé un cintre en fonte de 1m,50 environ d'épaisseur, dans le sens du rayon, et de 68 à 108 centim. de largeur dans le sens du fil de l'eau, par des *châssis* dont la longueur, suivant le cintre, a varié de 0m,74 à 0m,60. Ces châssis sont évidés de manière à présenter, dans les parements du pont, trois arcs concentriques réunis par des montants dans le sens des rayons. Pour augmenter la résistance contre le choc des corps flottants, il est avantageux de donner aux arcs, dans le sens du fil de l'eau, une dimension triple au moins de celle des montants.

Les châssis ci-dessus sont liés les uns aux autres, comme il suit : 1° par des arcs en fer forgé qui suivent leur cintre extrados et passent dans des rainures ménagées à cet effet dans les châssis; 2° par des *faux-tenons* ou clavettes, et par des mortaises ménagées dans les parois contiguës des deux chassis; 3° enfin par des *pattes* et des boulons dans les joints de contact des châssis.

Le vide des reins entre le cintre principal en fonte de chaque ferme et le plan de bois de la voie du pont a été rempli, tantôt par les anneaux en fonte déjà mentionnés ci-dessus, tantôt, comme au pont d'Austerlitz, en continuant concentriquement la même disposition de châssis.

Dans ces divers systèmes, on a cherché à rendre solidaires les fermes de la même travée, et à donner de la résistance, dans le sens du fil de l'eau, contre les vents, les glaces, les grandes crues, etc., etc., par des entretoises en fonte pleine ou évidée, et par des réseaux de tirants en fer forgé, formant des triangles, comme les contrevents dont il a été question dans les travées des ponts en charpente. On a même dans des projets non exécutés, étrésillonné les têtes des arches par des fermes obliques verticales, partant du milieu de ces arches, et aboutissant à des prolon-

gements des piles et culées, ainsi qu'il a été expliqué pour les ponts en charpente.

On a reproché au système de canevas de châssis de ne pas opposer de résistance aux changements de forme, par l'absence d'anneaux intérieurs, ou de croix de Saint-André en fonte ou en fer forgé. On y a remédié dans divers ponts exécutés en Angleterre, et dans celui de Bonar, en Écosse, représenté dans la figure 256 des planches. Figures 256 des planches.

Au pont d'Iéna, d'abord projeté avec travées métalliques, cette amélioration devait être faite également.

Les ponts entièrement en fer forgé n'ont été exécutés que sur une petite échelle. On en trouvera des exemples dans l'ouvrage de feu M. Bruyère, inspecteur général des ponts et chaussées, intitulé *Études relatives à l'art des constructions.*

On les a formés également de travées en arc de cercle, et dans chaque travée de châssis en quadrilatères, avec croix de Saint-André dans l'intérieur de chaque châssis. Figures 257 des planches.

On peut voir, dans l'essai théorique et pratique sur le fer, de feu l'Ingénieur Duleau, les dispositions qui avaient été projetées à Bordeaux pour un pont avec travées en fer forgé. Elles se réduisaient à composer les fermes des arches, de châssis en fonte disposés suivant un cintre, et dont le canevas, en fer forgé, était muni de croix de Saint-André. Figures 258 des planches.

Les fermes des travées dans les ponts fixes en fer, exécutés depuis une vingtaine d'années en Angleterre, présentent trois parties distinctes : 1° un cintre inférieur plus ou moins surbaissé, subdivisé en un nombre plus ou moins grand de voussoirs minces en fonte de fer; 2° des raccordements superposés à l'extrados de ce cintre, et qui s'élèvent jusqu'au-dessous de la voie du pont; 3° de cette voie elle-même.

L'Ingénieur Jessop a exécuté plusieurs arches de 30m47 d'ouverture et 4m57 de flèche, qui n'ont consommé chacune que 152,290kil. de fer *dit fer gris*, et dans lesquelles le cintre principal de chaque ferme n'est décomposé qu'en deux grandes pièces ou voussoirs qui s'arc-boutent au sommet de l'arche. Ponts fixes en fer le plus récemment exécutés en Angleterre.

Le pont de Southwark sur la Tamise, le pont sur le Trent dans le comté de Stratford, le pont sur le Lary, près de Plymouth, présentent à peu près les mêmes combinaisons; et l'on se bornera à décrire celui de Southwark. Figures 259, 260 et 261 des planches.

Chaque cintre de ferme de 64 mèt. d'ouverture y est décomposé en treize

voussoirs, ayant chacun 6m,20 de longueur développée; la hauteur de ces voussoirs, dans le sens du rayon de l'intrados à l'extrados, est de 2m,134; l'épaisseur, dans le sens transversal, est de 0m,09 avec pattes en retour de 0m,10 de largeur aux deux extrémités, pour les liaisons des voussoirs entre eux.

Pour compléter les analogies avec les voûtes en maçonnerie, les plans de joints qui se correspondent dans les fermes de la même travée sont formés de plaques transversales en fonte de mêmes hauteur et épaisseur que les voussoirs avec lesquels elles se réunissent à angle droit. Ces plaques, qui sont en deux et trois morceaux alternativement, sont d'ailleurs élégies d'une ferme à l'autre par de grands vides carrés avec arrondissements dans les angles. La liaison des plaques de joint avec les voussoirs a lieu par les pattes de retour de ces derniers, et par des nervures sur les plaques qui forment, au droit de chaque voussoir, des coulisses où l'épaisseur des voussoirs s'engage.

Le contreventement des plaques de joint ci-dessus, et par conséquent celui des fermes, est opéré par des pièces en diagonale en fonte de fer, dont le profil d'une plaque à l'autre est une croix qui se démaigrit en solide d'égale résistance depuis le milieu de la longueur de chaque arc-boutant jusqu'à ses points d'attache.

Les tympans des voûtes sont formés d'une série de trapèzes à joints verticaux décomposés en figures triangulaires, lesquelles, deux à deux, forment des losanges. Ces trapèzes sont limités haut et bas par des semelles en fonte; celle d'en bas, munie de rebords, doit s'appuyer sur l'extrados des voussoirs; celle d'en haut doit porter les pièces de support de la voie du pont; une troisième pièce intermédiaire, dirigée en arc, divise les trapèzes en deux parties par la hauteur. La liaison des trapèzes avec les voussoirs se fait par des tenons dans les premiers, et des mortaises dans les seconds, qu'on peut serrer par le côté avec des clefs.

Le contreventement des trapèzes des fermes de la même travée est effectué à la hauteur de l'*arc intermédiaire* de ces trapèzes par des croix de Saint-André en fer forgé et en fonte.

La voie du pont est composée de plaques en fonte de 1m,22 de largeur, et alternativement de 6m,70 et 3m,35 de longueur, fortifiées en dessous par des nervures dans les deux sens orthogonaux; ces nervures divisent les plaques *en cases ou caissons*, et servent aussi à les réunir aux semelles supérieures des trapèzes des tympans. Ces plaques, au lieu d'être pleines

sur le dessus, pourraient être aussi à *mailles* si la voie du pont était recouverte de planchers ou de dallages.

La décomposition des poids d'une *demi-grande arche* du pont de Southwark, est comme suit :

| | kilogrammes. |
|---|---|
| Voussoirs. . . . . . . . . . . . . . . . . . | 36,2152 |
| Diagonales . . . . . . . . . . . . . . . . . . | 18,524 |
| Plaques de joint. . . . . . . . . . . . . . | 62,016 |
| Croix de Saint-André . . . . . . . . . . . | 26,796 |
| Trapèze à losanges. . . . . . . . . . . . . | 183,960 |
| Plaques et culées adossées aux piles . . . . | 13,195 |
| Plaques de recouvrement sur la voie . . . . | 154,280 |
| Corniches et parapets . . . . . . . . . . . | 78,409 |

Le brillant succès qu'a récemment obtenu à Paris, M. Polonceau Inspecteur divisionnaire des ponts et chaussées, dans l'exécution du nouveau pont à fonte de fer à péage, dit des Saints-Pères, a fait faire un grand pas à la construction des ponts fixes métalliques. Wiebeking et Reichenbach, en Allemagne, et Gauthey en France, avaient déjà indiqué antérieurement l'emploi de tuyaux creux en fonte pour diminuer le poids des châssis élémentaires des cintres en fonte; mais ils n'avaient pas songé à substituer à ces châssis eux-mêmes, de grands tuyaux creux à section elliptique dont le grand axe est vertical. Les travées, au nombre de trois, du nouveau pont ont plus de 45 mètres d'ouverture sous $4^m,80$ de flèche au moins. Chacune d'elles est formée de 5 fermes, et chaque ferme est composée d'un grand cintre creux à section elliptique de $0^m,76$ de grand axe et de $0^m,40$ de petit axe, et qui n'est subdivisé qu'en 11 pièces sur tout son développement. igures 282 des planches.

L'extrados de ce cintre est raccordé avec le dessous du plan de bois, formant la plate-forme du pont, par des anneaux tangents au-dessus et au-dessous, liés les uns aux autres, et dont les diamètres vont croissant depuis le sommet des cintres jusqu'aux naissances.

Les fermes du pont des Saints-Pères sont reliées entre elles par des tirants en fer placés dans le sens du fil de l'eau, et contreventées diagonalement par de petits tuyaux creux en fonte.

Dans le nouveau chemin de fer de Londres à Birmingham, on a employé, pour deux viaducs métalliques, le système des anciens ponts allemands en bois, c'est-à-dire de simples fermes de têtes accouplées, dépassant

le *dessus de la voie du pont*, et supportant toute la charge de cette voie.

Figures 263 des planches. Les figures 263 des planches représentent le viaduc construit à la rencontre du canal du Régent : on y remarque que les entre-voies des rails sont en plaques de fonte dentelées ; que les gîtes des coussinets des rails sont en chêne, et reposent sur des maîtresses poutres transversales en fonte de fer, et que ces dernières à leur tour sont appuyées sur les groupes des fermes de tête.

Figures 264 des planches. Les figures 264 se rapportent au pont placé à la rencontre du canal de Paddington avec le chemin de fer de Birmingham à Bristol. Des grands arcs en fonte accouplés deux à deux aux deux têtes du pont, supportent la voie ; du côté des culées par des colonnes en fonte ; vers le milieu de l'arche par des tiges de suspension analogues à celles des ponts suspendus.

Levage. Le levage des fermes de travées métalliques s'opère d'ailleurs sur cintres en bois, quand ces fermes sont composées de voussoirs, comme les arches en pierres. Il s'exécute comme pour les fermes des ponts en bois, quand le système de composition des travées métalliques se rapproche de celui des travées en bois.

On terminera ces notions sommaires sur les ponts fixes en fer, par un tableau des dépenses de métal et des dépenses de construction de quelques-uns d'entre eux.

*Tableau des dimensions principales, poids en métal et dépenses totales de construction de quelques grands ponts fixes en fer.*

| INDICATION des ponts en fer. | Date de leur construction. | NOMBRE et grandeurs des arches. | Longueur totale de la voie. | Largeur de la voie. | Surface A de la voie. | Distance de la voie au fond de la rivière. | Produit B de cette distance par la surface A. | POIDS TOTAL en fonte de fer. | POIDS TOTAL en fer forgé. | DÉPENSE totale de construction. | POIDS de fonte par mètre quarré A. | POIDS de fer forgé par mètre quarré A. | POIDS de fonte par mètre cube B. | POIDS de fer forgé par mètre cube B. | Prix de revient par mètre quarré A. | Prix de revient par mètre cube B. | OBSERVATIONS. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Pont de Coalbrookdale en Angleterre . . . . | 1779 | 1 arche de 30m,63 d'ouverture presqu'en plein cintre. | mèt. 30,63 | mèt. 8,50 | m.q. 260 | mèt. 19 | m.c. 4.940 | kil. . . . . . | kil. 181.225 | fr. . . . . . . . . . | kil. . . . | kil. 188 | kil. . . . | kil. 46 | fr. | fr. | |
| Pont de Wearmouth, près Sunderland, sur le Wear (*Id.*), fondé sur le roc . . . . . . | 1796 | 1 arche de 73m,15 d'ouverture, de 13m,64 de flèche. | 73,15 | 15,00 | 1097 | 31 | 34.007 | 213.206 | 406.810 | 625.000 | 196 | 370 | kil. 6,30 | kil. 11,70 | 569 | fr. 18,30 | La dépréciation des valeurs monétaires rendrait le prix des mêmes maçonneries aujourd'hui plus coûteux ; mais, d'un autre côté, le fer est aujourd'hui moins cher en Angleterre qu'il ne l'était en 1796. |
| Pont de Buildwash, près de Coalbrookdale. | 1796 | 1 arche de 39m,62 d'ouverture. | 39,62 | 5,50 | 218 | . . . | . . . | 176.656 | | . . . . . . . . . . | 811 | | . . . | . . . | | | |
| Pont de Southwark sur la Tamise . . . . . . | 1818 | 3 arches. Celle du milieu 73m,15 d'ouverture sur 7m,315 de flèche. Les 2 autres ont chacune 64 mètres d'ouverture sur 6m,40 de flèche. | 215,00 | 13,00 | 2795 | 21 | 63.210 | 5.613.756 | 50.763 | 8.000.000 | 2009 | kil. 18,10 | 95 | kil. 0,90 | 2862 | 36 | |
| Ponts fixes en fer de M. Jessop. . . . . . | 1818 | 1 arche de 30m,47 d'ouverture sur 4m,57 de flèche. | 30,47 | . . . | . . . | . . . | . . . | 152.290 | | 98.912 | | | | | | | *Nota.* La plupart des ponts fixes en fer ayant été construits par des entrepreneurs régistes, il est difficile de connaître la dépense réelle de construction. |
| Pont en fer sur le Lary, près Plimouth . . . . | 1831 | 5 arches ayant chacune 45 mètres d'ouverture moyenne. | 250,00 | 7,20 | 1800 | 12 | 21.600 | . . . . | . . . . | 332.125 pour les maçonneries. 344.025 pour le métal. 676.150 | . . . | . . . | . . . | . . . | 375 | fr. 31,20 | |
| Pont en fer sur la rivière de Trent . . . . | 1831 | 1 arche de 42 mètres d'ouverture sur 4m,22 de flèche. | 42,00 | 6,60 | 277 | 9 | 2.493 | . . . . | . . . . | 62.500 pour fondations et abords. 79.825 pour culées. 95.000 pour le métal. 237.325 fr | . . . | . . . | . . . | . . . | 856 | 95 | |

On renvoie pour plus de détails sur les ponts métalliques, et sur le mode de calculer la résistance des travées et leur poussée contre les piles et culées, aux ouvrages de Gauthey, de Duleau, aux résumés de feu M. Navier sur la résistance des matériaux etc., etc.

---

# RÉSUMÉ DE LA VINGT-DEUXIÈME LEÇON.

### DES VIADUCS ET PONTS SUSPENDUS EN CHAINES DE BARRES DE FER ET EN CABLES DE FIL DE FER.

---

*Considérations générales sur les avantages et inconvénients des constructions suspendues.*

Ce système de ponts, qui ne date en Europe que d'une vingtaine d'années et dont l'origine est américaine, a été l'objet d'un traité théorique et pratique de M. Navier; d'un mémoire de M. l'Ingénieur Lemoyne sur les conditions d'établissement, de plusieurs mémoires de MM. Séguin, Vicat et Emile Martin. L'on trouve de plus, dans d'autres mémoires particuliers français et étrangers, et dans les publications des *Annales des ponts et chaussées* de 1831 à 1838 inclusivement, les descriptions historiques de beaucoup de constructions de ce genre faites dans ces derniers temps, des recherches qui s'y rattachent et notamment celles de M. l'Ingénieur Julien. On renvoie à ces documents pour les détails qui sortiraient des limites du présent résumé.

On fera remarquer que ce système de suspension est susceptible d'une foule d'applications : notamment pour des conduites d'eau, pour des ponts aqueducs et ponts canaux, pour supporter des toitures de bâtiments civils; cette dernière application se fait dans ce moment au port de Lorient, pour une toiture de 40 mètres de portée entre les points d'appui.

Figures 265 des planches.

Les viaducs et ponts suspendus, quelle que soit la matière employée à

leur confection, que ce soient des cordes, du bois, ou du fer, sont établis d'après la propriété qu'un polygone funiculaire, une courbe caténaire ou parabolique en équilibre, ont de transformer des pressions verticales, en tensions longitudinales, quand les liaisons des articulations ont une force suffisante. Comme les matériaux qu'on vient de citer offrent précisément une résistance beaucoup plus grande à la traction qu'à la compression ou à la flexion, on entrevoit immédiatement les avantages du nouveau système.

Il se prête d'ailleurs à la vérification de chacune de ses parties, à leur facile ajustage et mise en place, enfin à leur réparation. Sa rigidité est d'autant plus grande que le rapport de la flèche du polygone à l'ouverture totale est plus considérable; il s'adapte particulièrement au passage d'ouvertures très-larges lorsqu'elles exigent que la *voie du pont soit placée à une grande hauteur.*

Dans le système de suspension il n'y a pas de poids *improductifs* : comme dans les ponts en maçonnerie où l'impossibilité pratique de proportionner par des évidements les volumes des pierres à leurs fonctions de résistance, et le défaut d'homogénéité de cette espèce de matériaux, forcent d'exagérer de beaucoup les dimensions nécessaires :

Comme dans les ponts en bois où le dépérissement graduel oblige également à renforcer les dimensions auxquelles on pourrait sans cela se restreindre :

Comme dans les ponts fixes en fer, où malgré les évidements des pièces en fonte, et l'emploi judicieux du fer forgé, on est encore forcé de faire fonctionner ces matériaux dans des directions peu favorables à leur plus grande résistance.

Mais ces avantages sont accompagnés aussi d'inconvénients. Le déplacement d'une charge mobile éventuelle, modifie les conditions d'équilibre; et la forme du polygone funiculaire, ou de la courbe caténaire est variable; de là des ondulations dans la voie d'un pont suspendu. Si cette charge tout en cheminant est animée aussi de vitesse dans le sens vertical, elle donne lieu dans ce sens à des chocs, et à des vibrations qui en s'accumulant, peuvent acquérir une assez grande intensité.

Les alternatives de froid et de chaud, modifiant les longueurs du polygone ou de l'arc caténaire, donnent lieu à des abaissements ou des élévations de la voie du pont. Enfin ces ponts présentant une grande surface aux ouragans, peuvent osciller violemment comme un pendule et même être soulevés et projetés.

Ces ouvrages sont aussi exposés aux attaques de la malveillance, puisqu'il suffit quelquefois d'une légère incision pour affaiblir dans une proportion considérable la résistance des fers. La rouille vient d'ailleurs, malgré toutes les précautions, atténuer la force de toutes leurs parties; en sorte qu'ils exigent une surveillance bien plus assidue que les ponts fixes en maçonnerie, en bois, ou en fer.

Enfin les tensions que ces ponts exercent sur leurs points d'appuis et sur les points d'attache des chaînes imposent une grande solidité dans les fondations et maçonneries de support.

Sous le rapport de la dépense, on suppose en général qu'un viaduc ou pont suspendu est plus économique qu'un pareil ouvrage en maçonnerie, ou avec travées en fer; et qu'il ressort à peu près au même prix qu'un pont en charpente avec piles et culées en maçonnerie. L'origine récente de la plupart des viaducs et ponts suspendus existants, ne permet point du reste d'être fixé ni sur leur durée comparée à celle des constructions qu'on vient de citer, ni sur les avantages de telle ou telle espèce de matériaux employés à la suspension.

Dans les premiers essais de la suspension des ponts, les plates-formes de communication portaient sur la courbe caténaire, en sorte que les fardeaux descendaient et montaient par une pente variable d'un point à l'autre. Outre cet inconvénient, il y avait dans cette disposition peu de stabilité; et la transmission des charges et des chocs, se faisant sans intermédiaire aux chaînes de suspension, en compromettait la durée.

Figures 266 des planches.

Ce système, qui appartenait à l'enfance de l'art, n'est plus pratiqué que dans les contrées peu civilisées.

Un viaduc ou pont suspendu se compose aujourd'hui d'une plate-forme en charpente horizontale, ou à légère pente longitudinale, tantôt *suspendue*, par des tirants verticaux en fer, à un ou plusieurs systèmes de polygones funiculaires, ou arcs verticaux à peu près paraboliques fixés à deux points de rive, tantôt *portant sur* ces polygones et arcs par l'intermédiaire de colonnes pleines ou creuses en fonte.

On a classé parmi les ponts suspendus, des plates-formes portées par une série de tirants en fer obliques, lesquels viennent s'attacher à des supports fixes aux extrémités de chaque arche, et à un niveau plus ou moins élevé au-dessus de ces plates-formes. Ces tirants de fer ont été d'ailleurs projetés, tantôt divergents dans des plans verticaux, depuis la tête des supports jusques à la plates-forme; tantôt parallèles entre eux.

Figures 267 des planches.

Les polygones funiculaires ou arcs caténaires sont complets, ou *partiels* entre leurs appuis; ainsi ces appuis peuvent être au même niveau (figures 268 des planches) et alors le milieu de l'intervalle est le bas du polygone ou arc caténaire; ou bien ces appuis peuvent être à des niveaux différents, et alors le bas de l'arc ou du polygone se rapproche de celui des appuis de rive qui est le moins élevé: quand il est sur cet appui lui-même, la différence de niveau des deux appuis est précisément égale à la flèche de l'ouverture (figures 269 des planches).

Figures 268 et 269 des planches.

La hauteur de la plate-forme du pont, ou, quand elle est au-dessus des arcs, la hauteur du sommet des arcs, doit être réglée, au reste, comme pour les ponts fixes, par les sujétions du passage des transports en dessous.

Conditions principales de la suspension.

Les chaînes peuvent être *amarrées* aux appuis, qui forment alors culées, ou seulement passer par dessus pour se lier, soit aux chaînes des arches contiguës, soit à des chaînes d'*amarrage* arrêtées sur les rives.

Figures 269 des planches.

Enfin les appuis intermédiaires de plusieurs arches consécutives, peuvent ici, comme dans les piles des ponts fixes, être assujétis à fonctionner comme des culées, c'est-à-dire à résister à la tension d'une chaine indépendamment de la tension opposée de la chaîne suivante.

Le choix entre ces diverses combinaisons, la largeur et la flèche à donner aux arches des ponts suspendus, dépendent d'une foule de considérations qui excluent toute règle générale.

Les formules pour la tension maximum dans le sens des arcs, et la tension horizontale au sommet des appuis sont, d'après M. Navier, $T=\frac{P}{4}\sqrt{\frac{d^2}{4f^2}+1}$, et $Q=\frac{Pd}{8f}$, où P est la charge totale maximum sur l'arc, $d$ l'ouverture et $f$ la flèche.

Si l'on suppose que la charge permanente et la charge éventuelle (celle-ci est ordinairement comptée pour 200 kilogrammes par mètre carré) sont uniformément réparties, on voit: que plus le pont sera long, plus à égalité de flèche, la tension sera grande, et plus la force de toutes les parties de la suspension, des appuis et des points d'amarrage devra être considérable; mais aussi l'on pourra faire des économies sur le nombre des appuis; et, suivant la nature du terrain, suivant le prix des ouvrages de fondation et de maçonnerie d'une localité, cette économie pourra compenser et au delà l'augmentation de dépense indiquée ci-dessus.

A égalité d'ouverture, une grande flèche de courbure diminue les ten-

sions et toutes les dépenses qui en découlent; mais elle augmente le développement des arcs; car la formule qui donne la longueur totale d'un arc complet est $S = d\left(1 + \frac{1}{6}\left(\frac{4f}{d}\right)^2\right)$, où $d$ est l'ouverture et $f$ la flèche. Cette flèche considérable accroît aussi, d'autre part, les vibrations dans le sens vertical. En effet la formule qui donne l'augmentation de flèche pour un poids $p$ additionnel, est $\delta = \frac{\Pi}{2p} f$, où $\Pi$ est le poids primitif, $f$ la flèche primitive. Enfin les oscillations dans le sens transversal sont aussi plus fortes.

Jusqu'ici ces diverses considérations ont prédominé; car le maximum de flèche donné aux viaducs et ponts suspendus exécutés a été d'environ $\frac{1}{7}$, et le minimum de $\frac{1}{15}$.

Au pont de Fribourg, l'ouvrage jusqu'ici le plus considérable en ce genre, la flèche est de $\frac{1}{14}$ pour une ouverture de 208 mètres. C'est au reste le rapport qui est le plus ordinairement suivi.

Le système des demi-arcs caténaires, quand il n'y a point de pile intermédiaire, ou quand il n'y en a qu'une, et que de son sommet descendent deux demi-arcs caténaires, épargne un support et une portion de chaîne d'amarrage; mais, comme la flèche est doublée par le fait, la tension des chaînes et toutes les dépenses qui en résultent sont doubles de ce qu'elles seraient si, à égalité de flèche, les arcs étaient complets dans les mêmes intervalles.

Figures 269 des planches.

Le choix entre l'établissement d'appui faisant culées, ou seulement d'une dimension suffisante pour résister aux tensions opposées, dépend également de circonstances locales. Il est évident, par exemple, qu'on prendrait le premier parti, si en arrière des appuis de rive, il n'y avait pas possibilité de trouver des points d'amarrage solides pour les chaînes de retenue. Quant aux piles intermédiaires aux rives, il y aurait peut-être lieu à régler leurs dimensions pour l'hypothèse où les chaînes de chaque côté seraient indépendantes et attachées chacune à la pile, toutes les fois que *la charge variable et amovible serait dans une forte proportion relativement à la charge permanente.*

Ce sont encore les circonstances locales qui détermineront le choix à faire entre deux autres systèmes, l'un où les chaînes de suspension de chaque côté d'un appui sont attachées à cet appui, et l'autre où ces *chaînes sont liées l'une à l'autre et peuvent glisser sur l'appui en surmontant le frottement.* La première disposition a été adoptée pour le

grand pont de Bangor Ferry, sur le détroit de Menay, entre l'île d'Anglesea et la terre ferme, et pour les ponts exécutés par le célèbre Brunel pour l'Ile-Bourbon (figures 270 et 271 des planches). Figures 270 et 271 des planches

La seconde a été préférée généralement dans les ponts les plus récents et notamment aux ponts de Langon, d'Argentat, de Fribourg, parce qu'elle remédie aux variations de tension qui résulteut du passage des charges mobiles, et aux abaissements et rehaussements des chaînes résultant des variations de température. Elle exige toutefois, pour réduire le frottement, l'emploi au sommet de l'appui, de poulies fixées sur des axes, ou de rouleaux de friction cheminant dans une ornière. Figures 272 des planches.

On a cherché à atteindre le même but en faisant des supports en bois ou en métal, mobiles autour de leur pied, et pouvant par leur tête pencher tantôt vers le pont, tantôt vers les points d'amarrage. Cette dernière disposition a été suivie dans le pont de Bry-sur-Marne, d'une seule arche de 76 mètres d'ouverture, et d'une flèche moyenne de 6 mètres exécuté par M. Séguin, et dont la description est insérée aux *Annales des ponts et chaussées* de 1832. Figures 273 des planches.

On renvoie du reste à ce qui a été dit pour les fondations en maçonnerie en général, et pour les fondations en maçonnerie des viaducs et ponts en particulier, pour tout ce qui est relatif à cette partie des travaux des ponts suspendus.

Les points principaux étant réglés pour un pont à deux voies, on peut en supporter la plate-forme soit uniquement par deux systèmes caténaires de tête, soit par un troisième intermédiaire et qui diviserait le pont en deux voies, comme dans les ponts de l'Ile-Bourbon (figures 270 des planches). Dans ce dernier cas, il est essentiel de remarquer que le troisième système intermédiaire pourrait être exposé à une charge double de celle des systèmes de tête, et qu'il en faudrait tenir compte dans ses dimensions, celles de ses chaînes d'amarrage, et dans les zônes correspondantes des appuis fixes et des points d'amarrage. Figures 270 des planches.

Les ponts suspendus exécutés, surtout hors des villes, sont en général à une seule voie, avec trottoir d'un ou des deux côtés; leur chaussée varie entre $2^{m},70$ et $3^{m},50$, et les trottoirs entre 1 mètre et $1^{m},30$. Dans les villes populeuses, la chaussée est portée à $5^{m},10$, les grands trottoirs à $1^{m},50$. Figures 272 des planches.

Comme les matériaux de forte dimension, particulièrement les fers, offrent une moindre résistance par unité superficielle que ceux de petit échantillon; que cette résistance y varie davantage du périmètre au centre, que cependant ces fers sont plus chers au poids; ces considérations

Dispositions principales des arcs de suspension.

seules détermineraient à former chaque système de suspension de plusieurs arcs; mais l'on y est conduit en outre par la nécessité de répartir les chances d'accidents, de les rendre moins dangereuses, et surtout de

Figures 272 des planches.

faciliter les réparations et renouvellements. Il résulte cependant de cette précaution qu'une plus grande surface est exposée aux altérations causées par le temps et cet inconvénient est sérieux, lorsqu'on emploie, au lieu de chaines en barres de fer, des faisceaux de fil de fer. Aussi au grand pont suspendu de Fribourg, il n'y a que deux câbles de suspension en

Figures 274 des planches.

fil de fer sur chaque rive; mais les amarrages sont plus subdivisés; et à chaque câble de suspension correspondent cinq faisceaux séparés d'amarrages.

Ainsi, suivant l'ouverture et la flèche des travées, un système de suspension se compose de deux, trois et même d'un plus grand nombre d'arcs caténaires. Ces arcs peuvent être placés les uns à côté des autres, ou les uns au-dessus des autres; et quand il y en a un grand nombre, on adopte à la fois les deux dispositions. Chacune a du reste des avantages et des inconvénients faciles à saisir. En effet, si les courbes de suspension sont au-dessus les unes des autres, l'installation des rouleaux sur le sommet des supports est beaucoup moins facile. Si elles sont juxta-posées au sommet, il faut une augmentation de largeur dans la plate-forme *de support.*

Lorsque le tablier du pont, au lieu d'être suspendu aux chaines et de se trouver au-dessous d'elles, se trouve au contraire au-dessus et porte sur elles par des supports, on peut multiplier les chaines à volonté, et c'est là un des avantages de ce système, exécuté d'abord en Angleterre sur la ri-

Figures 275 des planches.

vière de Dee; puis à Genève, par le colonel Dufour, sur des dimensions de $18^m,40$ d'ouverture et environ $0^m,65$ de flèche. Un autre avantage c'est celui de dégager les abords du pont, de dispenser des portiques, etc. Mais le centre de gravité de chaque arche y étant beaucoup plus haut relativement aux points d'attache que dans le système de suspension de la plate-forme, ce dernier sera toujours préféré pour les grands arcs caténaires.

Les tiges de suspension, les colonnes de support qui transmettent la charge de la plate-forme aux arcs caténaires, sont disposés de manière à la répartir le plus uniformément que possible sur chaque arc du même groupe.

Pour donner au pont plus de stabilité contre les oscillations transversales, on incline quelquefois en dedans les tiges ou colonnes,

comme au pont de Fribourg, sauf à augmenter un peu leur force. Figures 276 des planches.

Leur attache aux arcs caténaires a lieu ordinairement au point de réunion des parties élémentaires de ces arcs; et leur liaison s'effectue tantôt directement sans intermédiaire avec les petites poutres transversales, tantôt indirectement par une semelle longitudinale qui reçoit les abouts de ces poutres; ces poutres ou semelles peuvent d'ailleurs se faire en bois, en fonte ou même en fer forgé. Figures 271 des planches.

Afin de diminuer la charge permanente, le plancher est en bois à deux plans croisés et séparés quelquefois par de la *bourre* qui amortit les effets des chocs; mais s'il était en matière plus lourde, il gagnerait de la stabilité contre les oscillations et les vibrations, *toutes les fois que les planchers seraient au-dessous des arcs caténaires*, puisque le centre de gravité du système serait alors plus bas.

Dans le but d'augmenter cette stabilité, surtout contre les ouragans, *même en augmentant la charge permanente*, on a projeté, dans plusieurs ponts, soit des tirants en fer inclinés, soit comme aux ponts de l'Ile-Bourbon, des chaines attachées au-dessous de la plate-forme en bois, et venant s'amarrer, autant que possible en divergeant, à la partie des appuis de suspension qui est en contre-bas de la plate-forme.

Pour diminuer l'effet des oscillations horizontales, on pourrait donner au tablier du pont une forme d'égale résistance, en l'élargissant progressivement depuis les extrémités jusqu'au milieu.

On arrive à peu près au même résultat, 1° en enracinant la plate-forme dans ses culées et piles; 2° par des groupes de tirants en fer diagonaux, placés en-dessous de la plate-forme, dans un plan horizontal, dirigés en X, depuis le milieu de chaque arche jusqu'aux extrémités, et se croisant avec les poutrelles transversales, et longrines longitudinales du tablier: cette disposition est analogue à celle des *contre-vents* dans les ponts fixes en bois, et en métal. Comme dans ces derniers, on a soin du reste de former les parapets de rive, par des systèmes de potelets avec croix de Saint-André intermédiaires, reliés avec les pièces inférieures de la plate-forme par des tirants en fer verticaux. Figures 277 des planches.

Appuis fixes de suspension.

Les appuis fixes des systèmes de suspension, soit sur les piles, soit sur les rives, doivent présenter des ouvertures pour le passage des voitures: on peut les exécuter en fonte ou en maçonnerie. Ordinairement afin de leur donner plus de masse et de solidarité, on les projette en portiques, avec arcades. Pour prévenir les disjonctions horizontales dans les maçonneries, Figures 272 des planches.

surtout lorsque le temps n'en a pas durci les mortiers, on lie les divers matériaux d'une même assise par des tirants en fer, des dés cylindriques en métal, ou tout autre mode. D'autres tirants et dés verticaux entrelacent les assises successives en hauteur.

On a publié dans les *Annales des ponts et chaussées* des expériences sur les déliaisons que des piliers de ponts suspendus sont susceptibles d'éprouver; elles mettent sur la voie des moyens de consolidation à employer. Aux deux culées d'environ 50 mètres de hauteur du pont suspendu en construction à Laroche-Bernard sur la Vilaine, on établit dans la hauteur et par intervalles à peu près égaux, des assises et plates-formes générales d'énormes libages, ou plutôt de pierres de taille essemilées, afin de répartir uniformément les charges supérieures, et de prévenir l'inégalité des tassements.

Points d'amarrages des arcs de suspension.

Les amarrages des systèmes de suspension en arrière des appuis de rive, peuvent être hors de terre, ou souterrains. Il est évident que, connaissant leur maximum d'effort, il sera toujours possible d'obtenir une résistance d'inertie équivalente, soit dans le terrain, soit dans des massifs de maçonnerie établis *ad hoc* : la seule difficulté, dans ce dernier cas, est de rendre les maçonneries bien solidaires. Autant que possible, les directions des amarres, doivent former avec les axes des supports fixes, des angles égaux à ceux que ces mêmes axes font avec les courbes de suspension; tout au moins la résultante des deux tensions doit tomber *dans l'intérieur* de la base du support fixe.

Figures 278 des planches.

Deux dispositions ont été suivies jusqu'ici pour les amarrages : dans la première ils se dirigent sans déviation jusqu'aux points d'attache, et il résulte de là, quelques économies; mais les matières dont le poids est opposé à la traction, étant placées normalement à la direction oblique des chaînes d'amarrage, perdent par cette circonstance une partie de leur poids, qui est employée inutilement en pression. Dans la deuxième disposition, employée notamment aux ponts de Fribourg, d'Argentat, de Genève, les chaînes d'amarrage se dévient pour s'enfoncer verticalement en terre; mais cette déviation exige des poulies, ou des rouleaux mobiles dans le coude, et une assiette très-solide *en forme de voûte*, pour porter les pièces mobiles et résister à la résultante des tensions de chaque côté du coude.

Figures 279 des planches.

Figures 273 et 275 des planches.

Quand cela est possible, il est utile de relier les maçonneries, ou charpentes d'attache des amarrages à celles des culées de rive, de manière à ce que le pont travaille en quelque sorte sur lui-même.

Pour éviter la prompte oxidation des amarrages par l'action de l'humidité souterraine, on les a enveloppés de mortier avec excès de chaux, ou mieux avec une pâte de chaux grasse, dont la mollesse indéfinie rend toujours possibles la visite et la réparation des ouvrages.

On renvoie aux ouvrages indiqués au commencement de ce chapitre, pour connaître; les diverses combinaisons d'amarrages dans les viaducs et ponts déjà exécutés; ainsi que les formules de calcul des efforts exercés, des amplitudes d'exhaussement et d'abaissement de la voie du pont, et de la résistance à donner aux diverses parties du pont suspendu.

On n'a pas parlé encore des matériaux qui formeraient les systèmes de suspension. **Matériaux employés dans la suspension.**

Les cordages ne peuvent servir évidemment que pour des ouvrages précaires ou provisionnels. Bien que M. Navier ait indiqué, dans son Traité, l'emploi du bois comme utile dans beaucoup de cas pour former les arcs caténaires, on n'y a pas eu recours, probablement à cause des chances de destruction dans les articulations, du prompt dépérissement de cette matière à l'air, et surtout des grands allongements qu'elle pourrait prendre et qui donneraient lieu à des oscillations considérables sous les charges amovibles.

Restent les métaux : le cuivre a été rejeté malgré sa durée plus grande, mais à raison de son prix élevé, de sa résistance moindre que celle du fer sous le même poids; tout au plus a-t-on fait en fil de laiton les suspensions de quelques passerelles.

Une controverse très-longue s'agite encore sur la préférence à donner au fer en barres sur les faisceaux de fil de fer.

Les partisans du dernier système ont objecté contre le premier : 1° plusieurs accidents de rupture, soit lors des épreuves, soit après l'exécution, soit après les épreuves des ponts; 2° la force du fer en barres moindre sous un poids déterminé, que celle du fil de fer et surtout la variabilité de cette force de la surface au centre de la même barre, et d'une barre à l'autre; 3° le moindre allongement du fer en barres avant l'altération de son élasticité et avant sa rupture; 4° la difficulté de faire des épreuves partielles, sans altérer le fer par le fait même de l'épreuve, en sorte que cette dernière apprend réellement *ce que le fer était, et non ce qu'il sera*; 5° la difficulté pour des ponts d'une grande ouverture, de placer les groupes de chaînes de chaque rive; 6° enfin, le levage plus facile des câbles en fil de fer. **Avantages et inconvénients respectifs des chaînes en fer et des câbles en fil de fer.**

Les partisans du système de chaînes avec barreaux de fer, répondent : 1° que les accidents signalés ont tenu à d'autres causes qu'à l'emploi de ce

système, et notamment à l'absence de toute épreuve préalable; 2° que les *fers doux*, étant employés exclusivement pour les systèmes de suspension, remédient à l'inconvénient d'un excès de rigidité; 3° que les fils de fer de diverses grosseurs présentent aussi beaucoup d'anomalies dans leur résistance par unité superficielle; 4° qu'il est très-difficile d'obtenir que, dans les faisceaux de fil de fer, les fils travaillent également, soit qu'on les range *par nattes*, soit qu'on les dispose circulairement; 5° que les faisceaux même, enduits avant leur réunion, et défendus contre les pluies et rosées par une manche en tôle, et enveloppés d'une gaîne de mastic qui doit interdire le contact de l'air, se rouillent beaucoup plus que des barres de fer de même force.

L'industrie particulière à laquelle on a attribué quelquefois plus de clairvoyance qu'aux administrations publiques, a eu recours, tantôt à l'une, tantôt à l'autre espèce de matériaux; ainsi au grand pont de Fribourg on a employé le fil de fer. Il a été adopté également pour le pont de Laroche-Bernard, dont l'exécution est faite par l'administration des ponts et chaussées, et qui sera le plus grand pont suspendu en Europe. Cependant dans cette localité l'humidité saline due au voisinage de la mer, sera une cause active d'oxidation.

Confection des chaînes de suspension.

Les chaînes de fer ont été formées de diverses manières: tantôt en barres isolées de fer carré, rond, et méplat; tantôt en anneaux oblongs de fer rond; tantôt en groupes deux à deux des barres précédentes presque juxta-posées.

La tension n'étant pas constante dans les chaînes de suspension depuis les supports jusqu'au bas des arcs paraboliques, on pourrait, surtout lorsque la flèche est considérable relativement à l'ouverture, partager tout le développement des arcs en plusieurs divisions, et diminuer de l'une à l'autre les dimensions des barres.

Figures 270 et 271 des planches

Le système d'anneaux oblongs se déforme facilement, à moins qu'on n'y intercale de petits dés en fonte pour maintenir l'écartement des deux branches, surtout près des coudes extérieurs. Ces coudes ont besoin aussi d'avoir une épaisseur presque double de celle de chacune des branches.

Le fer méplat, posé de champ présente cet avantage, qu'on peut le percer à froid à l'*emporte-pièce*, et qu'il n'a pas besoin de passer au feu pour fournir des boucles à ses extrémités.

Figures 280 des planches.

Les liaisons des barres consécutives d'une même chaîne se font en jumelant, de droite et de gauche, les extrémités correspondantes de deux

barres contiguës par des anneaux oblongs très-courts, réunis entre eux et avec *les pitons* des extrémités des barres par des boulons à écroux ou à clavettes Ordinairement ces boulons sont ovalisés et fendus en deux, de manière qu'on puisse en y engageant des calles en fer, rapprocher au besoin les extrémités des deux barres. On les fait en fonte, et, mieux en fer forgé. Figures 271 des planches

Les tringles de suspension de la plate-forme, en fer rond, passent ordinairement dans chaque articulation et par le jour qui reste entre les extrémités des barres consécutives. Ces tringles sont tantôt arrêtées sur une plaque en fonte portant sur les deux anneaux d'articulation, tantôt suspendues à un des boulons de l'articulation : le premier moyen paraît préférable. D'après cette disposition, on voit que les longueurs des barres d'une même chaîne, dépendent de l'espacement des tringles de suspension qui leur correspondent. Figures 281 des planches.

La portion des câbles; qui passe sur les sommets des supports est formée de longues barres courbes, ou d'une chaîne flexible à *petits maillons*.

La figure 282 des planches, indique l'engin dont on fait usage pour réparer et changer des portions de chaînes de suspension, sans arrêter la circulation sur le pont. Figures 281 des planches.

Les chaînes d'amarrage sont assemblées entre elles, et avec les chaînes de suspension, comme il vient d'être dit; mais on leur donne plus de force qu'à ces dernières; et souvent même pour avoir plus de garanties de la bonté du fer, on fait correspondre dans l'amarrage, à chaque chaîne en fer de suspension, ou barre isolée, un groupe de deux chaînes en fer de moindre échantillon.

Les câbles en fil de fer sont formés ordinairement par du fil de fer des n$^{os}$ 17 et 18, ayant $0^m,0026$ et $0^m,003$ d'épaisseur, pesant au mètre courant de 44 grammes à 57 grains, et vendu par rouleaux ayant de 140 mètres à 150 mètres de développement. Ils sont confectionnés de diverses manières. Confection des câbles de suspension en fil de fer.

Comme dans un faisceau circulaire de fils, les fils placés à l'intérieur et ceux placés à l'extérieur appartiennent à des courbes de longueurs différentes, et que suivant le mode de préparation il pourrait en résulter des inégalités de tension, M. Vicat avait proposé de former les câbles de faisceaux méplats de fils dévidés sous une tension uniforme. Même, dans un article inséré en 1831, aux Annales des ponts et chaussées, cet Ingénieur avait proposé de préparer les cables, non dans un chantier, mais dans leur emplacement même sur le pont, et à l'aide d'un petit chariot; en Figures 283 des planches.

sorte que la confection et la pose n'auraient été qu'une seule et même opération.

Figures 274 des planches. Au pont de Fribourg, l'on a formé chaque câble *suspensoir* de 20 écheveaux; chaque écheveau, renfermait de 48 à 56 fils, et était fabriqué dans le chantier de construction. Les écheveaux ont été montés successivement sur les supports; puis, après les avoir régulièrement juxta-posés pour avoir une tension uniforme, l'on a ajusté les tiges de suspension. Avec une machine à vis, l'on a arrondi tout le faisceau d'écheveaux et on l'a maintenu à cet état par des ligatures en fils de fer recuit.

On peut voir dans les articles insérés aux Annales des ponts et chaussées par MM. Vicat, le colonel Dufour et M. Challayes constructeur du pont de Fribourg, les divers modes de confection à employer. On remarquera qu'au pont de Fribourg, les câbles de suspension cylindriques, deviennent des faisceaux méplats à leur passage sur le sommet des supports, et reprennent ensuite la forme cylindrique.

Figures 274 des planches. Les câbles d'amarrage du même pont, sont au nombre de deux pour chaque câble de suspension; comme ceux-ci, ils s'épanouissent en faisceaux sur le rouleau de friction. Ce dernier transforme leur direction oblique, en direction verticale dans les puits; et ces faisceaux, reprenant la force cylindrique, vont s'attacher aux ancres du fond des puits.

Les fils de fer peuvent être employés de deux manières pour faire des câbles; soit par un fil sans fin se repliant sur lui-même pour ne former qu'un écheveau, et en réunissant ensemble les fils primitifs de toutes longueurs; soit en coupant tous les bouts de fil à la même longueur, et les assemblant par leurs extrémités. M. le colonel Dufour, de Genève, malgré le déchet que ce dernier mode peut causer, lui donne la préférence parce que les câbles ainsi fabriqués sont beaucoup plus réguliers et plus compactes. Dans tous les cas, M. le colonel Dufour recommande de redresser les fils de fer enroulés du commerce en les faisant passer *dans des peignes*, comme cela se pratique dans les fabriques de clous.

Figures 284 des planches. La réunion de deux brins de fils de fer se fait en les juxta-posant sur $0^m,10$ de longueur environ, et en les serrant par *une spire* à hélices contiguës faite avec du fil de fer recuit du n° 4. Ce moyen au pont de Fribourg a été reconnu si efficace, que les bouts des deux brins n'ont jamais glissé l'un sur l'autre dans les épreuves de rupture, et que le fil a toujours rompu au-dessus ou au-dessous de la ligature.

Figures 274 et 285 des planches. Les extrémités des câbles forment une boucle par la subdivision en

deux des faisceaux de fils; de fortes ligatures avec du fil recuit, sont faites à l'origine de la division. On place des croupières (fers à cheval) en fonte dans l'intérieur de la boucle. La liaison de deux câbles peut alors s'opérer ou, comme au pont de Fribourg, en juxta-posant les bouts des câbles et en intercalant des clés en fer entre leurs croupières, ou par des anneaux oblongs et jumelés, comme dans les assemblages de barres d'une même chaîne en fer. M. le colonel Dufour recommande de faire les croupières aussi grandes que possible, parce que les fils se couperaient dans une courbure trop prononcée, par exemple de $0^m,02$ de rayon.

Les tiges de suspension du tablier, qu'on peut faire à volonté en fer rond ou en faisceaux de fils de fer, et de préférence en fer, peuvent être tenus sur le câble, en un point quelconque; dans le premier cas, par un petit étrier dont les deux branches sont liées entre elles à l'aide d'un boulon qui porte la tige de suspension; dans le second cas, soit par ce même système où la croupière supérieure du faisceau vertical porterait alors sur le boulon susdit, soit par la disposition suivie au pont de Fribourg, où cette croupière *est portée* par un petit chevalet en fonte, lequel s'appuie lui-même sur deux câbles contigus. Figures 286 des planches.

Les moyens de liaison des extrémités inférieures des tiges en fer rond, ou faisceaux suspenseurs aux poutrelles de la plate-forme du pont, sont si divers et d'ailleurs si simples, qu'ils n'exigent aucun détail.

---

## RÉSUMÉ DE LA VINGT-TROISIÈME LEÇON.

TRACÉ, LEVAGE ET ÉPREUVE DES PONTS SUSPENDUS. — DES PONTS MOBILES DE DIVERSES DÉNOMINATIONS.

L'on a déjà dit que la courbe des câbles ou chaînes de suspension, chargés d'un plancher horizontal, était sensiblement une parabole dont le sommet est au bas de la courbe. Son équation est $y^2 = \frac{d^2}{4f} x$ ($d$ étant la largeur de l'ouverture, dans la supposition que les deux supports des rives sont de niveau, et $f$ la flèche). Tracé des ponts suspendus.

Il y a plusieurs procédés simples pour tracer la parabole sur une épure : on renvoie à ceux qui sont indiqués aux Annales des ponts et chaussées de 1832, dans un ouvrage de M. l'Ingénieur Lemoyne déja cité, et dans un article de M. l'Ingénieur Julien inséré aux Annales des ponts et chaussées de 1837.

On a donné plus haut la formule qui exprime la longueur de la courbe entre ses appuis. Comme les poids n'y entrent pour rien, pas plus que dans l'équation de la courbe, M. le colonel Dufour a fait remarquer qu'on pourrait avoir toutes les circonstances de cette courbe au moyen d'une petite chaine très-flexible et très-élégie qu'on mettrait dans la position où la grande doit se trouver, et à laquelle on suspendrait une tringle de fer horizontale par autant de fils qu'il doit y avoir de tiges de suspension dans le pont projeté. On trouverait ainsi la longueur de ces tiges.

Le calcul la donne également, en remarquant que chaque longueur est une abscisse de la parabole, et que l'ouverture est ordinairement divisée en parties égales de manière que chacune de ces parties est $\varphi = \frac{m}{n} \cdot \frac{d}{2}$, en sorte que l'abscisse $x = \frac{m^2}{n^2} f$. On voit que cette formule étant indépendante de $d$, donnera les mêmes valeurs pour $x$ toutes les fois que la flèche ne variera pas ; que l'ouverture sera divisée dans le même nombre de parties égales et qu'on en prendra le même nombre. De là un autre moyen de trouver une courbe de suspension, avec une *parabole étalon* exécutée en cuivre.

Comme il est convenable que la plate-forme suspendue ne présente jamais de creux permanent au milieu, et que dans toutes les hypothèses d'abaissement des chaines ou câbles de suspension, il est utile pour l'écoulement des eaux qu'il y ait au contraire une pente longitudinale, on calculera à l'avance le maximum d'abaissement, et l'on en tiendra compte dans la confection des tiges de suspension et dans la pose, pour élever d'autant le point milieu du tablier.

Quant aux barres formant les chaînes de suspension, on préférera toujours, pour la facilité de leur fabrication, leur donner pour longueur une partie aliquote de celle de la courbe, et dès lors les tiges de suspension seront à distances inégales.

Levage des ponts suspendus.

Le levage d'un pont suspendu ne doit se faire que quand les maçonneries ont eu le temps de durcir, surtout dans les points d'amarrage.

Si le pont est en chaînes avec barres de fer, ces barres ne présenteront

pas, quelle que soit l'ouverture, une section transversale totale de plus de $0^{déc.\ quar.},64$ pour chaque chaîne; ainsi, pour des ouvertures de 500 décimètres, 1.000 décimètres, 1.500 décimètres, 2.000 décimètres, le poids d'une chaîne pourrait s'élever à 2.700 kilogrammes, 5.400 kilogrammes, 8.100 kilogrammes, 10.800 kilogrammes.

Pour les câbles en fils de fer, il n'y a pas la même limite; puisque les faisceaux formant le câble peuvent en s'accroissant donner des diamètres de $0^{m},15$ à chaque câble; ainsi pour le pont de Fribourg, par exemple, il en serait résulté pour le poids total d'un câble, plus de 35.000 kilogrammes. Mais comme on avait pris le parti de morceler les câbles en écheveaux, le fardeau à lever a été réduit à 1.700 kilogrammes.

Les câbles d'amarrage du même pont de Fribourg, confectionnés dans le chantier, puis mis en place, pesaient chacun 1.500 kilogrammes.

Le système de levage des chaînes de suspension, pour des poids de 2.700 kilogrammes peut être le même que pour les *câbles* de suspension de faible diamètre, c'est-à-dire, qu'on peut les assembler dans le chantier sur une des rives, les faire passer à l'autre rive en les soutenant par des bateaux, puis les faire monter sur les supports en les amarrant à des cordes en chanvre, manœuvrées par des poulies et des treuils ou cabestans placés sur les mêmes supports ou à leur pied.

Mais pour des poids considérables, ce procédé serait probablement plus dispendieux que l'établissement d'une passerelle suspendue à faux frais, formée par des câbles et des cordes de chanvre, et par des plates-formes d'échafaudage amovibles également à faux frais; le tout étant appuyé et même amarré aux supports du pont définitif. On peut voir à cet égard dans les Annales des Ponts et chaussées, un article intéressant sur les ponts en cordages de M. Bodson de Noirfontaine.

Pour les ponts confectionnés par M. Brunel pour l'Ile-Bourbon, ainsi que pour le pont de l'allée d'Antin, à Paris, on s'est servi de câbles auxiliaires en chanvre, tendus d'un support à l'autre, le long desquels glissait une plate-forme d'échafaudage suspendue à ces câbles. Les ouvriers liaient à faux frais les barres de fer aux câbles en chanvre, au fur et à mesure qu'on réunissait aussi ces barres entre elles; quand les chaînes ont été ainsi complétement montées sur chaque support, on les a séparées du câble en chanvre et l'on a enlevé ce dernier.

On renvoie pour les détails du levage aux descriptions des ponts suspendus déjà citées, insérées aux Annales des ponts et chaussées de 1832 et 1835.

Épreuve des ponts suspendus.

Toutes les parties d'un viaduc ou pont suspendu doivent résister en tout temps à une charge temporaire, calculée à raison de 200 kilogrammes par mètre carré de surface de tablier; mais pour ne pas fatiguer et déliaisonner des maçonneries encore fraiches, on se borne, en France, avant la mise en service d'un ouvrage de ce genre, à une épreuve à *mi-charge*, en assujettissant le passage à des réglements de police limitatifs jusqu'à ce que l'épreuve complète ait été faite. On opère cette épreuve tantôt par des entassements progressifs de moellons, sur la hauteur et sur la longueur; tantôt en faisant arriver successivement sur le pont, à l'aide de palans, des files de voitures et chariots chargés, représentant la charge d'épreuve. Ce dernier moyen semble préférable pour prévenir les accidents.

Quant aux effets du choc, M. le colonel Dufour a fait des expériences desquelles il conclut : que chaque millimètre carré de la section d'une barre de fer, peut, sans danger de se rompre, supporter une force vive exprimée par 2 kilogrammes élevés à un mètre, et *cela lorsque la barre supporte déjà une traction longitudinale égale au tiers de la résistance à la rupture*. Ce même constructeur ajoute, qu'un pont suspendu qui a subi l'épreuve du maximum de charge *morte*, n'a rien à craindre des forces vives auxquelles il peut être soumis, et d'autant moins que la portée est plus grande. L'élasticité d'un système de suspension est le meilleur préservatif; les vibrations ne sont dangereuses que lorsqu'elles sont *cadencées*, et s'accumulent, ainsi que cela a lieu, par le passage d'une troupe d'hommes, ou d'animaux.

Bien que l'on puisse craindre que les fers en barres essayés après leur triage préalable, perdent dans cet essai une partie de leur force, cependant de nombreux accidents survenus dans des épreuves finales de ponts, par défaut d'épreuves préalables de chacune des pièces élémentaires, ne permettent pas de renoncer à ces dernières; mais il convient de s'arrêter à des charges inférieures à celles qui altéreraient l'élasticité.

Pour les fils de fer, le triage et l'examen attentif de tous les rouleaux peuvent suffire, puisque l'opération d'étirage des fils est elle-même la meilleure des épreuves de la résistance et de la ductilité du fer.

Conservation et entretien des ponts suspendus.

Les fers des chaines de suspension doivent être peints au minium, à plusieurs couches, surtout dans les liaisons; les bois doivent l'être à la céruse, mélangée d'ocre jaune pale. De plus de la peinture de céruse en pâte devrait être placée dans toutes les faces de contact des bois; et il

faudrait assurer l'écoulement de l'eau de tous les assemblages, soit par des petits trous de tarrière, soit en dressant en pente de l'intérieur à l'extérieur, les surfaces sur lesquelles l'eau séjournerait : c'est ordinairement en effet par les assemblages et contacts des bois que commencent leurs détériorations.

Pour les câbles en fil de fer, on peut préserver les fils de l'oxidation depuis leur livraison jusqu'à la confection des câbles, en les laissant immergés dans des dissolutions alcalines. Avant leur mise en place, on les fait passer, pendant deux heures et à trois reprises différentes, dans de l'huile de lin bouillante préalablement oxygénée pendant six à huit heures d'ébullition, par $\frac{1}{12}$ de litharge mêlée avec $\frac{1}{12}$ de noir de fumée. M. Challayes, constructeur du pont de Fribourg, annonce que les fils sont ainsi inaccessibles à l'oxidation, tant qu'ils ne sont exposés à aucun frottement. Les écheveaux des câbles reçoivent une forte application du même enduit qu'on renouvelle sur les câbles eux-mêmes après le levage. Enfin, M. Challayes au même pont de Fribourg, a ajouté à ces précautions une dernière couche de peinture blanche de céruse, qui laisse de suite apercevoir les premières traces d'oxidation.

M. Vicat, dans un article inséré aux Annales des ponts et chaussées de 1834, propose de soustraire les câbles ou faisceaux de fils de fer à l'action de la pluie et de la rosée, en les enveloppant d'un manchon en tôle peinte, formé d'un grand nombre de bouts assemblés à *double emboîture par crochets*, de manière à laisser tout le jeu désirable au câble.

L'application de l'étamage galvanique par le zinc sera probablement tentée avec succès pour les ponts suspendus, particulièrement à ceux en câbles de fils métalliques.

Quant aux parties souterraines des amarrages, l'on est d'accord pour les noyer dans une gangue de chaux grasse, ainsi qu'il a déjà été dit.

On terminera ces notions sommaires sur les ponts suspendus par le tableau des dimensions et prix de construction de quelqus-uns d'entre eux.

*Tableau des dimensions principales, poids en métal, et frais de construction de quelques passerelles et ponts suspendus en chaînes de fer et fil de fer.*

| INDICATION des ponts et passerelles. | Nombre des arches. | Longueur de la voie. | Largeur de la voie. | (A) surface de la voie. | Distance de celle-ci sur face au fond du lit. | (B) produit de cette distance par la surface de la voie. | POIDS total de la fonte de fer employé. | POIDS total du fer et du fil de fer employé. | DÉPENSE de construction. | Poids de fonte de fer employé: par mètre quarré A. | Poids de fonte de fer employé: par mètre cube B. | Poids de fer forgé ou fil de fer employé: par mètre quarré A. | Poids de fer forgé ou fil de fer employé: par mètre cube B. | Prix de revient: par mètre quarré A. | Prix de revient: par mètre cube B. | OBSERVATIONS. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Passerelles en chaînes de fer.* | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Passerelle de King-Meadow, en Angleterre sur le Tweed . . . | 1 | m. 33,50 | m. 1,22 | m.q. 41 | m. x—x | m.c. x—x | kil. x—x | kil. x—x | fr. 1.600 | kil. x—x | kil. x—x | kil. x—x | kil. x—x | fr. 39,60 | fr. | *Nota.* On fait remarquer que le bas prix des métaux en Angleterre et aux Etats-Unis y rend les ponts suspendus moins coûteux qu'en France. La plupart de ces ouvrages étant construits par des entrepreneurs péagistes, il est très-difficile de connaître la dépense réelle de ces constructions. |
| Passerelle de Dryburgh, sur le . . . . . . . . . . | 1 | 79.20 | 1,22 | 96,60 | 7 | 676,20 | x—x | x—x | 18.500 | x—x | x—x | x—x | x—x | 19,40 | 2,50 | |
| *Passerelles en fil de fer.* | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Pont de Philadelphie, sur le Schuilkill en Amérique. . . . | 1 | 122 | 9,60 | 73,20 | 7 | 512 | . . . . . | 596 | 1.600 | . . . | . . . | 8.10 | 1.15 | 22 | 3 | |
| *Ponts en chaînes de fer.* | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Pont sur la Merrimack aux Etats-Unis . . . . . . . . | 1 | 74.40 | 9,14 | 680 | 21 | 14210 | . . . . . | . . . . . | 135.500 | . . . | . . . | . . . | . . . | 199 | 9 | |
| Pont sur le Lehegh aux Etats-Unis. . . . . . . . . . . . | 2 | 145 | 9,10 | 1319 | . . . | . . . . . | 27.000 | | 108.400 | . . . | . . . | 20 | | 82,60 | | |
| Pont sur la Tweed en Angleterre. . . . . . . . . . . . | 1 | 110 | 5,40 | 604 | 11 | 6644 | 101.600 | | 152.500 | . . . | . . . | 168 | 15,30 | 252.40 | 23 | |
| Pont du détroit de Menay. . . | 1 | 170 | 8,54 | 1452 | 45 | 65340 | . . . . . . . . . | | 3.000.000 | . . . | . . . | . . . | . . . | 2066 | 45 | |
| Ponts pour l'Ile-Bourbon . . . 1° Pont sur la rivière Sainte-Suzanne. . . | 2 arches de 37 mèt. | 81 | 5,80 | 470 | 5,50 | 2585 | 65.000 f. pour objets en métal (1). | | 165.000 (1) | . . . | . . . | 138 | | 351 | 64 (1) | (1) Ces prix ne comprennent pas le transport des pièces en métal des ponts d'Angleterre à l'Ile-Bourbon. |
| Ponts pour l'Ile-Bourbon . . . 2° Pont du Mat . . . . . | 1 | 40 | . . . | 232 | x—x | . . . . . | 34.000 f. pour objets en métal. | | 35.000 | . . . | . . . | 698 | | 351 | | |
| Pont des Invalides, sur la Seine, à Paris (projeté par M. Navier). | 1 | 170 | 8,70 | 1479 | 12,50 | 18487 | 201.690 | 165.360 | 900.000 | 136 | 11 | 111 | 8,80 | 608 | 48,60 | |
| Pont de Langon, sur la Dordogne . . . . . . . . . . . | 3 | 200 | 6 | 1200 | 17 | 20400 | 32.000 | 95.400 | 600.000 | 26,60 | 1,56 | 79 | 4,60 | 500 | 29 | |
| *Ponts en fil de fer.* | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Pont de Tournon, sur le Rhône de M. Seguin . . . . . . | 2 | 180 | 5 | 900 | . . . | . . . . . | . . . . . | . . . . . | 200.000 | . . . | . . . | . . . | . . . | 222 | | |

*Ponts mobiles.*

On appelle ainsi, en général, tous les moyens *amovibles* de franchir un passage.

Ainsi les cordes ou chaines tendues en pente d'une rive d'un précipice à l'autre, et auxquelles on suspend un fardeau qui descend en glissant sont une sorte de pont mobile.

Dans les rivières et les ports on connaît les bacs ordinaires, bacs à traille, ponts volants, ponts de bateaux, raz et radeaux, qui bientôt feront place successivement, par les progrès de la civilisation, aux ponts fixes ou suspendus.

Le bac ordinaire est une embarcation d'une longueur et d'une largeur appropriées aux plus fortes voitures; variant, pour la longueur, de 9 à 18 mètres; pour la largeur, de 3 à 5 mètres, et dont le tirant d'eau est réglé sur le poids du bac et sur sa charge maximum. Bacs ordinaires.

Le fond en est ordinairement dressé en courbe concave, longitudinalement. Afin de les raccorder avec les pentes des rives d'accostage, on place aux deux têtes, des tabliers qui s'élèvent ou s'abaissent à volonté, lors de l'entrée ou de la sortie des voitures. Ce bac est remorqué tantôt par une chaloupe armée d'avirons; tantôt par un treuil ou cabestan établi sur la rive opposée à celle d'où l'on part ; tantôt enfin par une machine à feu fixée sur la rive, ou portée par l'embarcation de remorque elle-même. Figures 287 des planches.

Le bac à *traille*, de même forme que le précédent, est assujetti à cheminer le long d'une corde tendue sur l'eau ou au-dessus de l'eau dans une direction oblique au courant, de manière que le courant lui-même aide au mouvement. Dans les passages d'eau où le courant est très-fort, on dispose les rampes d'abordage de manière à ce que leur extrémité inférieure soit dirigée vers l'aval. L'inclinaison de ces rampes doit être telle qu'on puisse accoster à toute hauteur de l'eau : elle est ordinairement de $0^m,08$ à $0^m,12$ par mètre. Bacs à traille. Figures 288 des planches.

Le pont volant est tantôt un bac comme le précédent, attaché à une très-longue corde, laquelle est elle-même fixée au milieu de la rivière par une ancre; tantôt un groupe de deux bateaux liés l'un à l'autre surmontés d'une plate-forme horizontale en bois. L'ancre est à une distance des points de départ ou d'arrivée des rives, égale au moins à une fois et demie la longueur de la rivière. Le pont passe d'une rive à l'autre, ou d'une rive à un radeau ou bac stationnaire dans le courant, en décrivant un arc de cercle par l'effet du courant qui le frappe obliquement. Le trajet se fait assez rapidement, puisqu'on traverse en trois minutes le Rhin sur 360 mètres Ponts volants. Figures 289 des planches.

47

de largeur, et en cinq minutes la Dordogne sur 500 mètres de largeur.

Ponts de bateaux.

Un pont de bateaux ou radeaux est formé de plates-formes portées par des chevalets, lesquels sont placés sur des bateaux ou radeaux bien amarrés dans le sens du fil de l'eau. Les diverses travées d'un groupe de bateaux ou de radeaux à l'autre, sont liées, mais de manière à obéir aux dénivellations de l'eau, soit lors des marées, soit lors des crues. Sur les rivières navigables une partie du pont doit être amovible; et à cet effet, les bateaux ou radeaux qui la limitent sont juxtà-posés à ceux qui forment les extrémités des deux portions latérales fixes. Dans les circonstances urgentes, on construit ces ponts par parties ou *équipages* qui peuvent être à volonté indépendantes les unes des autres.

Figures 290 des planches.

Plans inclinés mobiles.

Dans les ports de mer, pour communiquer des quais aux bâtiments flottants amarrés à demeure, on fait usage de grands plans inclinés de 14 à 15 mètres de longueur, portés sur tourillons, ou sur roulettes en fonte à leur partie supérieure, et appuyés par leur extrémité inférieure sur le bâtiment flottant: quand la mer monte, le plan incliné devient moins rapide, et son pied s'avance sur la plate-forme du bâtiment; le contraire a lieu lorsque la mer descend. Ces plans inclinés sont formés de deux poutres de rive qui font corps avec la balustrade du parapet, à l'aide de systèmes de tirans verticaux et inclinés, et de potelets de support intermédiaires.

Figures 291 des planches.

Radeaux

Les radeaux sont des plates-formes en bois leger, portées par des poutres d'une pesanteur spécifique également beaucoup moindre que celle de l'eau: souvent on les tient à flot sous une forte charge, en y attachant des barriques ou tonnes vides.

Figures 292 des planches.

Raz

Les raz sont des *coffres* plats d'une grande surface horizontale, formés de bois légers et imperméables à l'eau.

Figures 293 des planches.

On fera bien de lire la description de l'ancien pont de bateaux de Rouen dans l'*Encyclopédie*, et celle des divers passages d'eau dans les ouvrages sur l'art militaire et sur celui des constructions navales.

Lorsqu'il n'est pas possible de concilier la hauteur des arches d'un pont avec les besoins de la navigation, ou quand on veut, dans un intérêt de défense ou tout autre, se réserver la possibilité d'interrompre une communication, on y établit un des ponts mobiles suivants: *pont-levis*, *pont à bascule*, *pont tournant*, *pont roulant*, *pont ascensionnel*, *pont amovible*; c'est-à-dire, qu'une partie de la plate-forme de communication,

Ou s'élève autour d'un axe horizontal placé à son extrémité,

Ou s'élève autour de cet axe placé au milieu de la longueur de la plate-forme mobile,

Ou tourne sur un axe vertical et se rabat sur un des côtés,

Ou roule en arrière suivant l'axe même de la voie,

Ou se déplace verticalement en montant et descendant,

Ou enfin est entièrement amovible.

Le choix entre ces divers systèmes dépend d'une foule de sujétions et conditions locales particulières.

Ainsi, dans beaucoup de cas, la promptitude de la manœuvre sera le point essentiel, tandis qu'il n'y aura pas à tenir compte de la force motrice pour l'opérer.

La nature des chargements qui passeront sur les ponts sera aussi très-variable.

Dans des villes populeuses, il y aura souvent à se préoccuper beaucoup plus du passage sur le pont mobile, que dessous ce pont. Ce sera le contraire loin des villes. Dans les deux cas, le genre de bâtiments qui devront passer sous le pont mobile, les uns à la voile et à la rame, les autres *toués*; leur destination spéciale, comme bateaux à vapeur ou comme bateaux ordinaires, leur configuration extérieure à *pleine charge*, suivant qu'ils seront chargés de charbons, de pierres ou de métaux, sont autant d'éléments de la question. Enfin, il faudra tenir compte des hauteurs respectives des terrains au niveau et dessous le pont mobile, des crues d'eaux, des marées périodiques, etc., etc.

Quand il ne s'agit que d'avoir un passage pour *les mâts et grèements* de bâtiments marchant à la voile, et que *la coque* des bâtiments peut passer sous la voie d'un pont, on se borne, comme à Breda, à Anvers et à Saint-Pétersbourg, à former ce pont de deux parties fixes de rive, solidement soutenues soit par des contre-fiches en-dessous, soit par des chaînes *en dessus*, amarrées à des supports de rive; et les extrémités de ces parties fixes portent des petits tabliers mobiles autour de charnières horizontales. Quand il y a deux tabliers mobiles dans un pont, ils viennent se contre-butter en faisant un angle *vertical* dont la tangente doit être au moins de 0,20. Figures 294 des planches.

Les ponts-levis ne sont guères employés que pour interrompre des passages de 4 à 5 mètres au plus, lorsqu'il n'y a qu'un seul de ces ponts; et de 8 à 10 mèt. quand il y en a deux. Ils sont particulièrement en usage dans les places de guerre. On sait que l'extrémité mobile de ces ponts est suspendue à des chaînes que l'on fait monter par une manœuvre opéré sur la rive. Ces chaînes, dans la pratique ordinaire, sont attachées à deux flèches de même saillie que la plate-forme mobile, et qui basculent sur le haut d'appuis fixes, par l'abaissement de leurs prolongements intérieurs munis de contre-poids. Ponts-levis.

Souvent ces mêmes chaînes, passant sur des poulies fixées au haut des appuis de rive, sont en relation avec un contre-poids *d'un effort variable.* Ce dernier, le plus généralement, descend le long d'une courbe calculée de telle manière, qu'il y ait à chaque instant équilibre autour du point de rotation entre la résistance variable du pont qui s'élève et la tension due au contre-poids, en sorte que l'effort à opérer pour la manœuvre du pont soit le moindre possible.

Figures 295 des planches.

Cet équilibre peut s'obtenir évidemment par trois combinaisons :

1° Faire varier le bras de levier d'un contre-poids constant ;

2° Faire varier le bras de levier seul ;

3° Faire varier à la fois le contre-poids et le bras de levier.

On peut voir dans les *Œuvres de Bélidor*, dans le *Mémorial du génie*, dans le *Devis général du canal de l'Ourcq*, dans la *Collection lithographique de l'École des ponts et chaussées*, beaucoup d'esquisses de ces trois systèmes de ponts-levis.

On emploie divers moyens pour donner de la résistance à la plate-forme mobile; ainsi elle est armée, en dessous, de contre-fiches qui tournent sur des points fixes en même temps que la plate-forme monte ou descend. Ces points fixes sont tantôt sur *les culées* de rive, tantôt en dessous du tablier, et alors leur extrémité mobile glisse le long d'une rainure verticale des culées de rive.

Figures 296 des planches.

Quelquefois le tablier abaissé est tendu par des chaînes inclinées qui sont fixées aux supports de rive du passage, et à une hauteur plus ou moins grande au-dessus du point de rotation de ce tablier. Les flèches elles-mêmes doivent être consolidées en dessus comme au canal de l'Ourcq, par un système triangulaire vertical d'armatures en fer.

Ponts à bascule.

Dans ces ponts, l'on nomme *volée* la partie qui s'élève; *culée* celle qui s'abaisse et va se rabattre *dans une fosse* pratiquée en arrière du point de rotation. *Les moments* de ces deux parties doivent se faire équilibre autour de l'axe de rotation, et celui-ci doit se confondre avec le centre de gravité du système. On donne ordinairement à la culée les $\frac{2}{5}$ ou $\frac{1}{3}$ de la longueur totale du tablier. Le mouvement de rotation s'opère par des treuils ou des engrenages. Ce genre de pont est renforcé également par des contre-fiches mobiles autour des points fixes comme dans les ponts-levis. Il est évident qu'on augmenterait de beaucoup la solidité des ponts à bascule, en attachant à l'extrémité de la culée une chaîne scellée au fond de la fosse, et en assemblant sur les poutres de rive le système triangulaire en bois ou en fer déjà indiqué pour les ponts-levis.

L'extrémité de la culasse, quand le pont est abaissé, est soutenue par un châssis ou *valet en bois*, mobile de diverses manières et notamment autour d'une charnière horizontale et transversale à la longueur du pont.

MM. les Ingénieurs Lamblardie père, Girard et Letellier ont imaginé divers systèmes de ponts à bascule, dont on trouve la description dans les ouvrages déjà cités. Figures 297 des planches.

Ces ponts permettent de franchir avec une seule plate-forme, un débouché de 6 à 7 mètres, et avec deux plates-formes, une sur chaque rive, 12 à 14 mètres de débouché. Mais le renfoncement nécessaire à l'abaissement de la culée est très-gênant, et son humidité hâte la détérioration des bois du bâtis mobile.

Ponts tournants.

Ces ponts, qui sont employés très-fréquemment, présentent également un arrière-train nommé culée, et un avant-train nommé volée; mais l'axe de rotation est vertical, et est d'ordinaire dans la ligne d'axe du pont, et, par suite, placé à une distance du parement des murs ou revêtements d'appui égale au moins à la moitié de la largeur de la voie du pont; attendu que le pont *rabattu dans son enclave* ne doit pas déborder les soutènements. Le fond horizontal de cette enclave est d'ailleurs plus bas que les abords du pont de *toute la hauteur verticale* de la plate-forme tournante.

Ici encore, il faut qu'il y ait équilibre entre les moments de la culée et de la volée, *y compris les frottements*; et le problème, assez difficile à résoudre, est de concilier la stabilité du pont sous le passage des charges mobiles avec la plus grande facilité que possible dans l'ouverture et la fermeture et dans le mouvement de rotation. La volée, lorsque le passage est rétabli, est également soutenue par des contre-fiches, qui se relèvent sous la plate-forme avant qu'on fasse le mouvement d'ouverture du pont. Pour soulager la volée et la culée, ou empêcher leur abaissement dans le mouvement de rotation, on a placé deux jeux de roulettes du *plus grand diamètre que possible*, avec chemins de fer, l'un sous la volée près de la rive de soutènement, l'autre à l'extrémité de la culée. On a d'ailleurs fortifié le bâtis général par le système triangulaire déjà indiqué pour les ponts à bascule. Figures 298 des planches.

Pour consolider ces ponts, on a quelquefois amarré l'extrémité de la culée à des chaînes scellées verticalement dans les soutènements du pont, et l'on a substitué aux contre-fiches indiquées plus haut deux potences, mobiles autour d'un axe vertical, et qu'on replie dans des encastrements ménagés dans les soutènements. On parvient ainsi à franchir, avec un seul pont, des passages de 7 à 8 mètres, et avec un pont sur chaque rive, des passages de 14 à 16 mètres. Figures 299 des planches.

La manœuvre se fait par des cabestans, treuils ou engrenages. Elle dure avec un seul homme environ trois minutes.

Les pièces qui terminent les volées des deux ponts opposés sont taillées en *arc de cercle* d'un centre différent de celui de rotation, afin de s'emboiter l'une dans l'autre à recouvrement. L'enclave de la culée doit également être refouillée en arc de cercle. Dans quelques ponts l'une des volées est plus longue que l'autre et repose sur elle.

M. Lamblardie père avait imaginé un autre système de pont tournant qui immergeait ou émergeait d'une faible quantité, à l'aide d'un caisson mobile : on peut voir sa description dans le traité de Gauthey.

Figures 300 des planches.

L'inconvénient des ponts tournants est d'exiger une longueur presque double de celle du passage à couvrir. Cet inconvénient disparait lorsque le passage des eaux est plus grand que le passage navigable, parce que le point d'appui se trouve alors sur une pile, et que la *culasse* mobile couvre le reste du débouché des eaux.

On doit à l'obligeance de M. l'Inspecteur divisionnaire des ponts et chaussées Raffeneau de Lisle, la communication des dessins d'un nouveau système de ponts tournants, depuis longtemps exécuté par lui à Ostende en Belgique, et adopté par le conseil général des ponts et chaussées dans ses principales dispositions pour le sas éclusé du nouveau bassin de Saint-Malo et Saint-Servan.

Il consiste particulièrement : dans un système de contre-fiches *jumelées* qui restent sous le tablier de chaque moitié du pont, pendant sa rotation, en décrivant des portions de *surfaces coniques* autour de leurs pieds retenus sur les culées. Ces contre-fiches s'engagent dans des enclaves ménagées sur les culées de rive, lorsque le pont est complétement ouvert. Des dispositions très-ingénieuses, 1° permettent aux extrémités des volées de se soulever pour l'ouverture et la fermeture, 2° lient ces deux opérations aux opérations inverses des barrières qui ferment au public l'accès du pont, avant qu'il ne soit prêt à fonctionner.

Figures 301 des planches.

M. Raffeneau de Lisle a établi un chariot avec douze boulets mobiles dans un cercle horizontal, pour supporter le pont à l'entour du centre *géométrique* de la rotation, quand ce centre est dans l'axe longitudinal du pont.

Mais cet ingénieur a fait exécuter aussi des ponts tournants qui ont parfaitement fonctionné, dans lesquels les centres de rotation sont sur le côté de chaque moitié du pont, ce qui réduit là longueur totale des deux tabliers d'une quantité égale à la largeur d'un tablier.

M. Décessart avait proposé pour le port de Tréport un système exécuté à

Brest par M. l'Ingénieur en chef Lecor, et depuis à Bruxelles. Il consiste, pour un pont tournant de 7 mèt. de portée, ou de 14 mèt. d'ouverture totale, à le diviser en deux parties, tournant l'une à droite, l'autre à gauche, chacune sur un axe vertical. Il n'y a plus de culasse formant contre-poids; chaque tablier est lié à son axe par des contre-fiches. Quand les axes dans ce système sont dans le *nud* des culées, le passage pour un pont, à une seule volée, est réduit toutes les fois que le pont est ouvert, de toute la demi-largeur du tablier. Figures 302 des planches.

On a proposé sur des cours d'eau, pour diminuer le *moment* de la volée, et par conséquent celui de la *culasse* des ponts tournants, de placer sous la volée des étançons verticaux appuyés par leurs extrémités inférieures sur des *caissons flotteurs* immergés dans l'eau.

On renvoie pour plus de détails aux ouvrages déjà cités plus haut.

Ponts roulants.

Ce genre de ponts mobiles est peu employé. Il est composé également d'une volée et d'une culée; la plate-forme mobile avance ou recule par des roulettes du plus grand diamètre que possible fixées à la culée et marchant sur des chemins de fer. Le centre de gravité *devant toujours être sur la rive*, la culasse a besoin d'être plus longue que la volée; il faut de plus un *tablier mobile* en prolongement de la culasse et presque aussi long qu'elle; enfin, les roulettes ne pouvant avoir généralement qu'un faible diamètre de 20 à 30 centim., les frottements rendent la manœuvre difficile.

Pour soutenir la volée *mise en place*, on se sert : 1° de poteaux qui peuvent monter ou descendre jusqu'à ce qu'ils portent sur le radier du passage, et qui se logent dans les enclaves des soutènements quand le pont est retiré; 2° de contre-fiches mobiles par leur extrémité inférieure, qui s'engagent également dans des *enclaves* quand le pont est retiré. Figures 303 des planches.

De plus, on peut, en réunissant la volée à la culée par les assemblages triangulaires déjà indiqués figures 296 des planches, donner à tout le système une rigidité suffisante, surtout quand en même temps l'extrémité de la culée, lors du passage des voitures, sera assujettie à des chaînes scellées profondément dans la maçonnerie.

On peut également franchir, avec ce genre de pont, des espaces de 6 à 8 mètres, quand il n'y a qu'un seul pont; et de 12 à 16 mètres quand il y a un pont sur chaque rive.

La manœuvre se fait par des treuils, cabestans ou engrenages, comme dans les ponts précédents.

Ponts à mouvement vertical ascensionnel et descensionnel.

On a proposé quelquefois pour le passage facultatif des cours d'eau, un tablier horizontal, que l'on aurait abaissé jusqu'au fond de l'eau, et que l'on aurait relevé par des contre-poids. Une pareille plate-forme ne

Figures 304 des planches.

se conserverait pas si elle était en bois, et serait trop lourde si elle était métallique : on a proposé aussi d'élever avec des chaînes un tablier analogue, au lieu de l'abaisser.

Ponts amovibles. Figures 805 des planches.

Sur le canal de l'Ourcq on a établi un bateau amovible formant pont. En Hollande, sur les canaux du Helder à Amsterdam, il existe également des ponts sur bateaux flottants qui ferment un passage de 18 mètres.

Les deux embarcadères de rive sont en charpente, et pourraient être en maçonnerie. Quand on veut ouvrir le passage, on rentre le bateau par en dessous dans le renfoncement d'un des embarcadères. Lorsque le bateau est en place, il est réuni aux embarcadères par deux petits tabliers. On pourrait éviter ces derniers ; en donnant au bateau des saillies par lesquelles il s'appuierait sur les têtes des embarcadères et aurait une voie de plein-pied avec la leur ; et en installant sur le bateau les moyens de le faire immerger et émerger à volonté d'une certaine hauteur. Il est évident que ces ponts amovibles ne conviennent que sur des points où les passages en dessus et dessous peuvent être l'objet *d'alternements périodiques et à heure fixe.*

Les *bateaux-portes à deux quilles*, dont il sera question dans la dernière partie du résumé relative à la navigation extérieure, ont été aussi employés comme ponts amovibles pour le passage des rivières. En Hollande, on s'en sert pour des passages de 18 mètres.

On ne donne généralement aux ponts mobiles que la largeur nécessaire pour le passage d'une voiture ; c'est-à-dire de 2$^m$,50 à 3 mètres. Dans les villes on ajoute deux trottoirs ayant chacun ordinairement 1$^m$,50.

En Angleterre, et en Belgique particulièrement, on a substitué la fonte et le fer forgé au bois dans la plupart des ponts mobiles, et en particulier des ponts tournants ; et l'on a pu obtenir ainsi le maximum de résistance avec le minimum de poids. Mais les ponts métalliques coûtent à peu près le double des ponts ordinaires en bois. Celui d'Anvers, à deux volées pour 17 mèt. d'ouverture, a employé 100,000 kil. de fonte ouvrée ; le poids de chaque ferme y est de 4,000 kil. Les figures ci-contre, 306 et 307, représentent ceux de ces ponts qui ont le plus de portée, et sont sur la plus grande échelle. On remarquera que les pivots y sont au milieu de la longueur des volées.

Figures 306 et 307 des planches.

En considérant les ponts mobiles dans leur application à l'interruption temporaire de passage sur des ponts fixes pour les besoins de la navigation, on reconnaîtra que le *thalweg* frayé par les bateaux étant presque toujours au milieu de la rivière, les ponts-levis et ponts roulants sont les seuls qui

puissent être employés ; car les ponts à bascule et les ponts tournants exigeraient une épaisseur considérable dans les piles ou culées qui serviraient d'appuis à la rotation ; et de plus, les ponts à bascule affaibliraient ces piles par le vide nécessaire à leur arrière-train. Feu M. l'Ingénieur Duleau a publié, dans la *Collection lithographique de l'École des ponts et chaussées*, des dessins de la plupart des ponts mobiles nouveaux ; on trouve aussi dans les *Annales des ponts et chaussées* de 1833, la description faite par M. l'Ingénieur en chef Mary, d'un des ponts tournants d'une seule volée du canal de la Somme.

Les ponts tournants du canal Saint-Martin d'une seule volée de 7m,80 d'ouverture et de 5m,16 de largeur ont été exécutés en bois avec chariots à galets, de manière à pouvoir ultérieurement les faire en fonte. Ils ont coûté 22,000 fr., auraient coûté 40,000 fr. en fonte, et seulement 12,000 fr. s'ils avaient été exécutés dans le système peu stable des ponts de Belgique avec crapaudine. Feu M. l'ingénieur Duleau présentait comme suit le détail de la dépense dans chaque cas :

*Premier cas, celui de l'exécution.*

| | | | |
|---|---|---|---|
| Bois | 25m | à 200 fr. | 5,000 fr. |
| Fonte ouvrée | 4500 kil. | à 080 fr. | 3,600 fr. |
| Fer forgé | 4500 kil. | à 170 fr. | 7,650 fr. |
| Fonte ordinaire | 9000 kil. | à 030 fr. | 2,700 fr. |
| Plombs, peintures et autres frais | | | 3,050 fr. |
| Total | | | 22,000 fr. |

*Deuxième cas, ponts en fonte.*

| | | | |
|---|---|---|---|
| Fonte ouvrée | 30000 kil. | à 050 fr. | 15,000 fr. |
| Fer forgé | 5000 kil. | à 170 fr. | 8,500 fr. |
| Bois | 15m | à 200 fr. | 3,000 fr. |
| Fonte ordinaire | 2500 kil. | à 030 fr. | 7,500 fr. |
| Montage et autres frais | | | 6,200 fr. |
| Total | | | 40,200 fr. |

*Troisième cas, comme les ponts en Belgique.*

| | | | |
|---|---|---|---|
| Bois | 25m | à 200 fr. | 5,000 fr. |
| Fer forgé | 3000 kil. | à 170 fr. | 5,100 fr. |
| Peinture et autres frais | | | 1,900 fr. |
| Total | | | 12,000 fr. |

FIN DE LA DEUXIÈME PARTIE,

RELATIVE AUX VIADUCS ET PONTS FIXES EN MAÇONNERIE, EN CHARPENTE ET EN MÉTAL, AUX PONTS SUSPENDUS ET AUX PONTS MOBILES.

# APPENDICE N° 1.

*Épreuves sur la résistance sans et avec altération d'élasticité de fermes en charpente de diverses grandeurs et formes.* (Extrait des Annales maritimes et coloniales, de février et novembre 1837.)

1° Procès-verbal d'épreuve d'une ferme en sapin du Nord pour les nouveaux ateliers et magasins de mâtures ouvrées au *port de Lorient*, de $10^{m}$ de portée et $1^{m},40$ de flèche.

Conformément aux décisions ministérielles, on a fait confectionner une ferme d'essai en sapin du Nord pour la charpente des nouveaux ateliers et magasins de mâtures ouvrées, sur 20 mètres de portée, $2^{m},50$ de flèche, et 6 cent. d'épaisseur.

Figures 20 des planches.

Comme l'entrait inférieur est formé de deux pièces réunies à mi-épaisseur, on a, pour consolider le système, introduit les tirants diagonaux en fer marqués X sur le dessin.

La charge totale permanente, en sus du poids de la ferme et uniformément répartie dans sa section transversale, sera ainsi composée :

| | |
|---|---|
| Poids du zinc sur une surface de $43^{mq} + 20^{mq},05 = 881^{mq},50$, à $8^{kil},13$ l'un. . . . | $7,166^{kil.}$ |
| Bordé sous le zinc en sapin du Nord, $881^{mq},50 \times 0^{m},02 \times 800^{kil}$. . . . . . . . . . . | 14,104 |
| Faite (comme dans les projets). . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . | 826 |
| Liernes (comme dans les projets). . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . | 1,600 |
| | 23,696 |

qui, divisés par 37 fermes, donnent pour la charge permanente de chacune d'elles, en sus de son propre poids, mais uniformément répartie sur toute la section transversale. . . . . . . . . . $640^{kil}$

Les charges accidentelles sont : 1° celles d'un ouragan; 2° celles dues au levage d'un des bas-mâts de vaisseau emmagasinés.

Charge accidentelle d'un ouragan.

La charge accidentelle d'un ouragan *colonial*, à la vitesse la plus grande observée de $33^{m}$ par seconde (quadruple de celle d'un ouragan violent d'Europe), a été évaluée à $300^{k}$ par mètre carré, normalement à sa direction, qu'on suppose incliné de 14° à l'horizon.

Elle sera sur une surface de toiture à la pente de $\frac{150^{m}}{1185^{m}}$ = tang. 11° 55'.

| | |
|---|---|
| $300^{kil.} \times \sin. (14° \times 11° 55') = 300 \times 0,4371 =$ . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . | $134^{kil}$ 13 |
| Ce qui, pour la moitié de la toiture N. et S., donnerait. . . . . . . . . . . . . . . | 59,117 |
| Et pour une ferme, en charge uniformément répartie des deux côtés du faîte. . . | 1,597 |
| En cas de trombes, la charge sur les deux rampants de la toiture pourrait être de . | 118,234 |
| Et pour une ferme en efforts uniformément répartis des deux côtés du faîte. . . . | 3,194 |

Charge accidentelle due au levage d'un bas-mât.

Cette espèce de charge ne se présentera peut-être jamais, puisque déjà diverses dépêches ministérielles ont défendu par anticipation de fixer des points d'attache à la charpente pour le levage des mâts; mais comme il peut arriver que cette défense soit oubliée par la suite des temps, il importait que dans ce cas l'existence des ouvriers ne fût pas en danger, et que la charpente elle-même ne fût pas mise hors de service. Le poids d'un bas-mât est de 23,000 kil.; mais à raison de sa longueur, des pièces de liaison qui vont d'un entrait à l'autre, des habitudes pratiques de la maistrance des ports, on peut aussi admettre que le poids du bas-mât sera supporté par toutes les fermes, ce qui fera, pour chacune d'elles, au plus 622 kil. Mais ce poids pourra être placé, tantôt au milieu de la largeur du bâtiment, tantôt à $3^{m}$ à droite ou à gauche de l'axe longitudinal du bâtiment, tantôt à $6^{m},50$ de ce même axe. Bien qu'il n'y ait aucune chance, pour ainsi dire, que le levage *possible* d'un bas-mât à l'aide de la charpente se rencontre précisément avec un ouragan de $33^{m}$ de vitesse par seconde, on a dû, pour remplir les intentions de la dépêche précitée, supposer un pareil concours pour les épreuves à faire.

Quant aux oscillations que la ferme aura à supporter, le soussigné fait observer qu'il ne peut pas y en avoir dans le sens de la longueur des bâtiments, à raison des liaisons établies dans ce sens, et des points d'arrêt que fournissent les maçonneries des pignons. Les oscillations qui seront possibles dans le sens transversal ne sauraient avoir d'action que sur les tiges et chaînes de suspension de l'atelier de mâtures; et, tant que le système général oscillera, il n'y aura point d'effort exercé sur les matériaux qui forment ce système; ce ne sera que dans les moments

d'immobilité que leur résistance sera mise en jeu, et alors elle aura à fonctionner comme s'il n'y avait pas eu d'oscillations antérieurement, c'est-à-dire comme si la charpente était fixe. Au reste, en fût-il autrement, le soussigné n'aurait pu qu'à grands frais établir une ferme d'essai oscillant, comme une sorte de pendule, autour d'un axe lui-même amovible.

Dans les épreuves dont on va donner le tableau, on a essayé, *sous le rapport du temps,* de se rapprocher autant que possible des circonstances réelles; ainsi le levage d'un bas-mât, le passage d'une trombe étant des événements d'une courte durée, il était inutile d'exposer la ferme, pendant un temps un peu long, aux poids correspondants; mais la charge permanente pouvait être augmentée de la charge accidentelle d'un ouragan, sur un des côtés de la toiture pendant 10 à 12 heures; aussi l'on a laissé la ferme subir cette épreuve pendant 18 heures.

On s'est assuré, à chaque épreuve différente, si la ferme reprenait sa position primitive : en d'autres termes, si *son élasticité n'était pas sensiblement altérée*; mais, en examinant le tableau ci-dessous, l'on doit tenir compte du tassement du système dans les diverses articulations, et surtout de *l'affaissement dû à la pénétration des bois de la ferme dans les chantiers sur lesquels elle était posée*, et qui laissaient entre eux 20m de portée à la ferme.

Les charges ont été uniformément réparties à l'aide de 17 plateaux suspendus autant que possible à 1m de milieu en milieu, à partir du faîte. Les affaissements étaient observés par des ouvriers sur des règles intermédiaires, fixes et verticales, également à 1m de distance environ. L'on avait soin sur ces règles, après chaque épreuve, de marquer un nouveau zéro.

*Tableau des épreuves successives faites du* 15 *au* 18 *mars* 1836.

| CHARGES EN SUS DU POIDS DE LA FERME. | | CÔTES EN CONTRE-BAS de la position initiale pour chaque espèce d'épreuve | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | à 0m,50 du faîte | à 1m,50 du faîte | à 2m,50 du faîte | à 3m,50 du faîte | à 4m,50 du faîte |
| | | mill. | mill. | mill. | mill. | mill. |
| 0, poids seul de la ferme. | à droite du faîte | 6 | 10 | 9 | 8 | 5 |
| | à gauche du faîte. | 9 | 9 | 10 | 10 | 6 |
| NOTA. L'on a pris, après ce premier tassement, de nouveaux repères d'après lesquels les côtes ultérieures ont été comptées. | | | | | | |
| 527 kil., poids simple de 17 plateaux uniformément répartis. | à droite du faîte | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| | à gauche du faîte. | 1 | 3 | 2 | 3 | 0 |
| 527 kil., poids des 17 plateaux, plus 225 kil. de poids mis dessus, ou 752 kil. uniformément répartis qui forment la charge permanente d'une ferme forcée d'un sixième environ. | à droite du faîte. | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 |
| | à gauche du faîte | 4 | 4 | 4 | 5 | 1 |

| CHARGES EN SUS DU POIDS DE LA FERME. | | CÔTES EN CONTRE-BAS de la position initiale pour chaque espèce d'épreuve. | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | à $0^m$,50 du faîte. | à $1^m$,50 du faîte. | à $2^m$,50 du faîte. | à $3^m$,50 du faîte. | à $4^m$,50 du faîte. |
| | | mill. | mill. | mill. | mill. | mill. |
| o, poids seul de la ferme | à droite du faîte. | o | o | o | o | o |
| | à gauche du faîte. | o | o | o | o | o |
| ** 752 kil. représentant la charge permanente uniformément répartie, plus 1.597 kil. de charge maximum, en cas d'ouragan, uniformément répartie sur le rampant à droite du faîte, après 18 heures d'épreuve. | à droite du faîte | 19 | 28 | 36 | 36 | 25 |
| | à gauche du faîte | 19 | 18 | 15 | 12 | 5 |
| o, poids seul de la ferme | à droite du faîte | 1 | 3 | 5 | 5 | 5 |
| | à gauche du faîte. | 2 | 2 | o | o | 2 |
| 752 kil., charge permanente uniformément répartie, plus 2.325 kil. de charge uniformément répartie sur les deux versants, en cas de trombe. | à droite du faîte. | 30 | 33 | 35 | 32 | 21 |
| | à gauche du faîte. | 31 | 34 | 39 | 38 | 23 |
| o, poids seul de la ferme. | à droite du faîte. | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 |
| | à gauche du faîte | 2 | 3 | 3 | 3 | o |
| 752 kil. de charge permanente, plus 3.194 kil. de charge maximum, en cas de trombe, uniformément répartie entre les deux versants | à droite du faîte | 39 | 41 | 44 | 40 | 26 |
| | à gauche du faîte. | 41 | 43 | 48 | 47 | 28 |
| o, poids seul de la ferme | à droite du faîte. | 4 | 4 | 3 | 2 | 2 |
| | à gauche du faîte. | 3 | 4 | 4 | 4 | 1 |
| 752 kil. de charge permanente uniformément répartie, plus le poids de 622 kil. représentatif d'un bas-mât de vaisseau, suspendu à $6^m$,50 du milieu de la ferme à gauche du faîte | à droite du faîte | 8 | 6 | 6 | 3 | 4 |
| | à gauche du faîte | 6 | 11 | 22 | 17 | 6 |
| o, poids seul de la ferme | à droite du faîte. | o | o | o | o | o |
| | à gauche du faîte | o | o | o | o | 2 |
| 752 kil. de charge permanente uniformément répartie, plus le poids de 622 kil. ci-dessus, suspendu à 3 mèt. au milieu de la ferme et à droite du faîte. | à droite du faîte. | 11 | 15 | 19 | 14 | 9 |
| | à gauche du faîte | 10 | 10 | 9 | 8 | 9 |
| o, poids seul de la ferme. | à droite du faîte. | o | o | o | o | 2 |
| | à gauche du faîte | o | o | o | o | o |
| ** 750 kil. de charge permanente uniformément répartie, plus le poids de 622 kil. ci-dessus, suspendu au milieu de la ferme. | à droite du faîte | 12 | 13 | 11 | 11 | 5 |
| | à gauche du faîte. | 11 | 12 | 11 | 7 | 5 |
| ** o, poids seul de la ferme. | à droite du faîte | o | o | o | o | o |
| | à gauche du faîte | o | o | o | o | o |
| 752 kil. de charge permanente uniformément répartie, plus 3.194 kil. de charge maximum, en cas de trombe, uniformément répartie sur les deux versants, en tout 3.946 kil. de charge uniformément répartie, plus un poids de 622 kil. représentatif par ferme de celui d'un bas-mât de vaisseau, suspendu à $6^m$,50 de distance du milieu de la ferme | à droite du faîte. | 47 | 47 | 50 | 43 | 30 |
| | à gauche du faîte | 47 | 54 | 70 | 64 | 34 |
| o, poids seul de la ferme | à droite du faîte. | 3 | 5 | 5 | 2 | o |
| | à gauche du faîte | 4 | 5 | 7 | 6 | 7 |
| Même charge uniformément répartie que ci-dessus; mais le poids de 622 kil. étant suspendu à 3 mètres du milieu de la ferme à droite | à droite du faîte | 50 | 57 | 63 | 54 | 35 |
| | à gauche du faîte | 48 | 54 | 53 | 48 | 35 |
| o, poids seul de la ferme | à droite du faîte | 4 | 5 | 2 | 3 | o |
| | à gauche du faîte. | 3 | 4 | 3 | o | 2 |
| *Charge la plus grande que la ferme puisse avoir à supporter dans de courts instants.* | | | | | | |
| ** 3.946 kil. de charge uniformément répartie, plus 622 kil. suspendus au milieu de la ferme, représentant le poids d'un bas-mât par ferme. | à droite du faîte | 51 | 54 | 55 | 51 | 31 |
| | à gauche du faîte | 52 | 55 | 59 | 54 | 31 |
| ** Poids seul de la ferme | à droite du faîte | 5 | 4 | 3 | 3 | 1 |
| | à gauche du faîte | 5 | 5 | 3 | 1 | 2 |

On peut inférer des divers chiffres du tableau précédent, et particulièrement de ceux marqués d'un astérisque, et en faisant la part aux anomalies et aux erreurs de ceux qui signalaient les diverses cotes, qu'on peut employer avec sécurité le système de ferme représenté dans le dessin pour couvrir les nouveaux ateliers et magasins de mâtures ouvrées. On doit surtout considérer que les alternatives fréquentes, dans les épreuves relatées ci-dessus, où la ferme était libre, puis chargée d'un grand nombre de manières différentes, ont fatigué beaucoup les liaisons, et ont représenté ainsi, mais avec une sorte d'exagération, ce qui se passe réellement dans les charpentes de toiture.

Si l'on veut tenir compte de la diminution de résistance due à l'influence du temps, et du dépérissement graduel des bois et des fers, on peut porter l'épaisseur du plan de bois qui n'est que de $0^m,06$ à $0^m,08$ et même à $0^m,10$.

*Signé* REIBELL.

Lorient, le 21 mars 1836.

---

*Expériences sur la résistance sans et avec altération d'elasticité de grandes fermes en charpente et en sapin, faites de 1830 à 1832, sous la surveillance et d'après les observations directes de M. Reibell, ingénieur en chef directeur des travaux maritimes au port militaire de Lorient.*

Les charges d'épreuve ont été faites avec des plateaux qui étaient autant que possible suspendus à 1 mètre de distance horizontale l'un de l'autre, suivant les lignes verticales marquées 0, 1, 2, dans chaque figure : chaque plateau avec son amarrage pesait environ 31 kil.

Figures 308..318 des planches.

Les abaissements des diverses parties des cintres étaient mesurés sur des lignes verticales graduées, placées également et autant que possible à 1 mètre de distance l'une de l'autre, en *a*, *b*, *c*, *d*, *a'*, *b'*, *c'*, *d'*.

On commençait par abandonner les fermes à leur propre poids ; puis on chargeait seulement les plateaux 0 et 1 et jusqu'à ce qu'on fût arrivé à la limite où l'élasticité paraissait s'altérer; on passait ensuite successivement aux plateaux 2, 3 et 4, qu'on chargeait jusque à la même limite ; puis aux plateaux 5 et 6, après quoi l'on chargeait simultanément tous les plateaux.

A chacune de ces diverses combinaisons de charge, on renouvelait les repères, à partir desquels les abaissements et exhaussements devraient être mesurés.

On renvoie aux *Annales maritimes et coloniales* pour les détails des diverses épreuves, et on se borne à transcrire ici le tableau final et résumé, en appelant l'attention sur les résultats consignés dans la colonne A. On y voit que les rapports des *poids productifs* représentant l'effet utile des fermes, avec les poids des fermes varient depuis 0,91 jusqu'à 15,40, c'est-à-dire que dans plu-

sieurs des combinaisons de charpente essayées, le bois n'est pas employé d'une manière avantageuse, bien qu'elles convinssent pour la grandeur et la forme extérieure de la charpente.

| DESCRIPTION SOMMAIRE DES FERMES D'ÉPREUVE. | Ouverture de la ferme ou distance entre les appuis. | Flèche totale de la ferme sous le cintre. | Largeur des parties cintrées dans le sens du rayon. | Épaisseur du plan de bois de la ferme. | CHARGES uniformément réparties, correspondant à un abaissement maximum de 12 mètr. à 17 millim | | VOLUME de la ferme. | POIDS de la ferme. | (A) rapport des poids d'épreuve précédents avec celui de la ferme. | CHARGES uniformément réparties par lesquelles l'élasticité n'était pas sensiblement altérée. | | CHARGES uniformément réparties par lesquelles l'élasticité était visiblement altérée. | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | avec le poids propre des fermes. | sans le poids des fermes. | | | | Avec le poids propre des fermes. | Sans le poids des fermes. | Avec le poids propre des fermes. | Sans le poids des fermes. |
| Cintre courbe dont les pieds sont engagés dans un entrait (fig. 308). | m. 8,80 | m. 3,74 | cent. 25 | cent. 12 | kil. 2304 | kil 2079 | stères 0,3762 | kilog. 225,70 | 9,20 | kil. 2304 | kil. 2079 | kilog. 3654 | kilog. 3429 |
| *Id.* (fig. 316). | 8,80 | 2,933 | 30 | 18 | 3228 | 3819 | 0,5800 | 340,00 | 11,10 | 4678 | 4329 | 6253 | 5904 |
| *Id.* (fig. 317). | 8,80 | 2,20 | 30 | 18 | 5347 | 5004 | 0,508 | 343,00 | 15,40 | 5327 | 5004 | 6227 | 5904 |
| *Id.*; mais lié à son entrait par des moises verticales pendantes, et abandonné ainsi à lui-même (fig. 308) | 8,80 | 3,74 | 25 | 12 | 3498 | 2979 | 0,865 | 519,00 | 5,74 | 3498 | 2979 | 7098 | 5079 |
| *Id.* (fig. 316). | 8,80 | 2,933 | 30 | 18 | 6340 | 5454 | 1,476 | 886,00 | 6,14 | 6340 | 5454 | 7015 | 6129 |
| *Id.* (fig. 317). | 8,80 | 2,20 | 30 | 18 | 5822 | 5004 | 1,363 | 818,00 | 6,10 | 5822 | 5004 | 6272 | 5454 |
| Cintre courbe dont les pieds sont engagés dans un entrait (fig. 314). | 12,70 | 6,35 | 30 | 18 | 1966 | 1378 | 0,98 | 588,00 | 2,34 | 1966 | 1378 | 2459 | 1865 |
| *Id.* (fig. 315). | 12,70 | 4,233 | 30 | 18 | 2381 | 1991 | 0,816 | 490,00 | 4,06 | 4131 | 3641 | 4581 | 4191 |
| *Id.* (fig. 312). | 15,80 | 7,90 | 30 | 18 | 1596 | 840 | 1,26 | 756,00 | 1,00 | 971 | 1215 | 2346 | 1590 |
| *Id.* (fig. 313). | 15,80 | 5,26 | 30 | 18 | 2597 | 1965 | 1,05 | 632,00 | 3,10 | 2597 | 1965 | 2972 | 2340 |
| *Id.* (fig. 310). | 16,40 | 3,50 | 30 | 18 | 2964 | 2353 | 1,02 | 611,00 | 3,85 | 2964 | 2353 | 5564 | 4953 |
| *Id.*; mais relié à son entrait par des moises verticales pendantes, et abandonné ainsi à lui-même (fig. 314 | 12,70 | 6,35 | 30 | 18 | 3412 | 2028 | 2,306 | 1384,00 | 4,40 | 4062 | 2678 | 4712 | 3328 |
| *Id.* (fig. 315). | 12,70 | 4,233 | 30 | 18 | 4451 | 3204 | 2,08 | 1249,00 | 2,50 | 5803 | 4554 | 6153 | 4904 |
| *Id.* (fig. 312). | 15,80 | 7,90 | 30 | 18 | 2331 | 1590 | 2,90 | 1741,00 | 0,91 | 2331 | 1590 | 3706 | 1965 |
| *Id.* (fig. 313). | 15,80 | 5,26 | 30 | 18 | 4270 | 2715 | 2,59 | 1555,00 | 1,74 | 4270 | 2715 | 5770 | 4208 |
| *Id.* (fig. 310). | 16,40 | 3,50 | 30 | 18 | 4317 | 3003 | 2,19 | 1314,00 | 2,26 | 4317 | 3003 | 8117 | 6903 |
| Cintre courbe assemblé avec arbalétriers rampants, dont les pieds ne sont qu'engagés dans un entrait (fig. 309) | 8,80 | 3,74 | 25 | 12 | 5674 | 5229 | 0,74 | 443,00 | 11,80 | 5222 | 4779 | 6572 | 6129 |
| *Id.* (fig. 311). | 16,40 | 3,50 | 30 | 18 | 5403 | 4303 | 1,83 | 1100,00 | 3,91 | 4778 | 1678 | 9953 | 8853 |
| *Id.*; mais lié à l'entrait par des moises verticales pendantes, et abandonné ainsi à lui-même (fig. 309). | 8,80 | 3,74 | 25 | 12 | 7316 | 6579 | 1,23 | 737,00 | 8,92 | 5516 | 4779 | 10906 | 10179 |
| *Id.* (fig. 311). | 6,40 | 3,50 | 30 | 18 | 9973 | 8041 | 3,22 | 1732,00 | 4,67 | 3973 | 2041 | 14173 | 12441 |
| Charpente formée par deux arbalétriers réunis à un entrait (fig. 318). | 7,83 | 2,44 | 22 | 8 | 1483 | 1386 | 0,161 | 97,00 | 14,30 | 1183 | 1086 | 1780 | 1686 |
| *Id.*; mais avec liaison de l'entrait avec le point de rencontre des arbalétriers au sommet (fig. 318). | 7,83 | 2,44 | 22 | 8 | 2710 | 2436 | 0,456 | 274,00 | 8,88 | 2260 | 1986 | 2510 | 2436 |

# APPENDICE N° 2.

*Méthode graphique pour résoudre, sans calcul, les principaux problèmes relatifs à la forme et aux dimensions des murs de revêtement.*

(Extrait de l'ouvrage de M. de Prony, intitulé : *Recherches sur la Poussée des terres*, etc. Paris, 1802.)

### *Usage de cette Méthode.*

*Planche ci-contre.* Construisez un parallélogramme rectangle ABCD, tel que AD étant divisé en 100 parties, AB contienne 55 de ces parties; portez AE égal à 30, et AF égal à 45 des mêmes parties.

Divisez AE, que j'appelle *ligne des talus des murs*, en 60 parties; FB, que j'appelle *ligne des pesanteurs spécifiques*, en 30 parties; et, de chaque point de division, menez des lignes droites au point D.

Numérotez, 1° les divisions de AE, de 1 à 30, en prenant deux divisions pour un numéro (1); 2° les divisions de FB, en mettant le nombre 60 au point F, et les nombres 61, 62, etc., aux points suivants, jusqu'au point B, qui portera le nombre 90.

La figure, en cet état, peut servir pour tracer les profils des murs lorsque les terres qu'ils ont à soutenir sont dans le cas d'être ou renflées ou extrêmement délayées; et j'ai déjà observé qu'il était convenable de s'en tenir là, dans plusieurs cas de pratique ordinaire, afin de tout sacrifier à la solidité. Mais si on est bien assuré

(1) Cette indication de divisions est relative à une épure en grand que M. de Prony a fait graver. Dans la fig 3 de la planche qui est jointe à cet appendice : les divisions sont établies de numéro en numéro, et elles sont cotées de 5 en 5 divisions.

qu'aucun changement d'état possible des terres ne peut faire varier leur talus naturel au delà d'une limite donnée, les épaisseurs pourront être réduites par une règle dont l'exécution graphique est fondée sur le tracé suivant.

Faites TC égal à FB, et rapportez sur TC les trente divisions de FB; décrivez des arcs concentriques, terminés aux lignes DC et DA, dont le centre commun soit en D, et dont les extrémités des rayons soient au point de division de TC. Divisez CH en degrés (chaque degré est $\frac{1}{100}$ du quart de cercle, conformément au nouveau système métrique); tirez dans l'angle BDC, par les points de division du quart de cercle CH, et par le centre D, des droites prolongées jusqu'à la ligne CB. Il faut observer que tous les prolongements compris dans le quadrilatère BH$h$NB, ne sont que de construction, et pourront être tracés au crayon seulement.

On numérotera les degrés (ou centièmes du quart de cercle) sur l'arc intérieur KT, l'origine étant au point T; et à côté de chaque degré sera écrit le nombre de centièmes et de millièmes parties de DC, que contient la partie de la ligne CB, comprise entre le point C et le prolongement du rayon qui passe par le point de division sur lequel ce degré est marqué.

Si l'on donne à AD un demi-mètre de longueur, ce qui est une très-bonne proportion pour l'exactitude, chaque centième de DC sera de 2 millimètres $\frac{1}{4}$; et avec une échelle divisée par des *transversales*, on aura aisément des millièmes de DC. Ainsi les numéros à porter sur TK s'évalueront très-bien au compas (1).

Enfin, à partir du point N, extrémité de la ligne DN, qui fait avec DC un demi-angle droit, on écrira des nombres sur les divisions de NC, correspondantes au point de rencontre de cette ligne et des prolongements des rayons de l'arc C$h$. Ces nombres seront écrits sur les divisions de l'arc C$h$, pris de deux en deux, c'est-à-dire que ces derniers nombres étant 0, 16, 31, 47, 63, 79, 95, 110, 126, 142, 158, etc. (dans l'hypothèse où KT serait divisé en parties égales), les nombres portés sur les divisions de NC, à partir de N, seront 0, 31, 63, 95, 126, 158, etc. Tels sont les nombres portés sur les divisions de NC, sur la grande épure; mais comme sur la figure jointe à cet Appendice, ces divisions ne sont numérotées et cotées que de 5 en 5, les premières cotes au-dessous de N sont de 158,325, etc.

---

(1) Cette évaluation n'est cependant que pour les ouvriers qui n'ont aucune connaissance théorique de géométrie et de calcul : les ingénieurs verront sur-le-champ que les nombres dont il s'agit sont les tangentes tabulaires des angles cotés sur l'arc TK. Les logarithmes de ces tangentes, rapportées à la nouvelle division décimale du quart de cercle, se trouvent dans les Tables de *Callet* et dans celles de *Borda*; on les obtient immédiatement en nombres naturels dans les excellentes Tables publiées à Berlin par *Hobert* et *Ideler*.

Tout le tracé précédent ne donnant encore que des rapports, pour en venir à des longueurs absolues, on tracera, de chaque côté de la figure, six lignes parallèles et égales à AD : l'une de ces lignes sera une échelle de 25 mètres, et les cinq autres, des échelles de 20, 15, 10, 5 et 2 mètres. On pourra, dans chaque opération, prendre celles qu'on voudra parmi les échelles qui contiennent assez de mètres pour que la hauteur du mur puisse y être portée ; mais, une fois qu'on l'aura adoptée, il faudra la conserver pendant tout le cours de l'opération.

L'on fait observer que les divisions des lignes FB et TC comprennent les rapports des pesanteurs spécifiques des terres à la maçonnerie, depuis $\frac{60}{100}$ ou $\frac{3}{5}$ jusqu'à $\frac{90}{100}$ ou $\frac{9}{10}$; et s'il existe des cas où l'on se trouve obligé de sortir de ces limites, ils doivent être très-rares. Cependant si ces cas arrivaient, ou si on voulait appliquer la formule à des cas hypothétiques, il suffirait de prolonger les divisions de FB, soit dans le sens FA, soit au delà de B par rapport à F, et de mettre aux nouvelles divisions les numéros qui leur conviendraient relativement à celles existantes entre F et B. On opérerait d'après les numéros plus petits que 60, ou plus grands que 90, précisément de la même manière qu'on opère sur ceux depuis 60 jusqu'à 90 ; et les résultats applicables depuis 40 ou 50 jusqu'à 120 ou 130, auraient toute l'exactitude nécessaire pour la pratique.

Il est à propos de construire la figure ou *formule graphique* que je viens de décrire, sur un carton fort et lisse, afin de la rendre plus durable ; et voici comment on s'en servira pour suppléer aux formules analytiques dans la détermination des dimensions des murs de révêtement.

Supposons qu'on veuille bâtir un mur de 13 mètres de hauteur, avec un talus de 8 centièmes de mètre par mètre de hauteur, d'un seul côté, pour soutenir des terres, dont un mètre cube pèse le $\frac{77}{100}$ du poids d'un mètre cube de maçonnerie, et qui nouvellement remuées, prennent un talus dont la hauteur soit les $\frac{44}{100}$ de la base.

Je prends, sur l'échelle de 15 mètres, une longueur D*h* représentant 13 mètres, et je trace légèrement, au crayon, une ligne *hk*, parallèle à CD (1) ; la partie *e''f'* comprise entre D*e*, qui correspond au talus 8, sur la division de AE, et de D*f* qui correspond au numéro 77 sur FB, sera l'épaisseur du mur au cordon ; menant ensuite *f'*G perpendiculaire sur DC, le trapèze D*e''f'*G sera le profil transversal du mur qu'on veut construire.

Si le mur devait avoir un talus de 8 centièmes de chaque côté ; après avoir

(1) Il sera préférable, pour ne pas fatiguer la figure, de faire tout le tracé sur du papier *serpente* qu'on appliquera sur cette figure.

mené la ligne $hk$, on aurait, pour l'épaisseur du mur au cordon, la ligne $e''f'$, dont le point $e''$ se trouve sur la ligne $De'$ qui correspond au numéro 8 plus $\frac{1}{2}$ de 8, c'est-à-dire au numéro 12 de la division de la ligne AE. Par ce point $e'''$ on mènerait $e'''d$ parallèle à la ligne $e''D$, qui se termine au numéro 8 de la division de AE; portant alors $he''$ de G en $d'$, le trapèze $de'''f'd'$ sera le profil transversal du mur à construire.

En général, l'extrémité postérieure $f'$ de la ligne supérieure du profil se prend sur la ligne $Df$ qui correspond au rapport des pesanteurs spécifiques; quant à l'extrémité antérieure, s'il n'y a qu'un talus, elle se prend sur une ligne De qui répond à la cote de ce talus sur la division de AE; et s'il y a deux talus égaux, elle se prend sur une ligne $De'$, qui répond à une fois et demie la cote de talus sur la même division de A, aux intersections de ces lignes et de $hk$.

Supposons maintenant qu'on veuille donner au mur deux talus différents, l'un extérieur de 12 centièmes, et l'autre intérieur de 6 centièmes. On aura toujours l'extrémité postérieure de la ligne supérieure du profil en $f'$ sur la ligne $Df$ correspondante au rapport $\frac{22}{...}$ des pesanteurs spécifiques. Pour trouver ensuite l'extrémité antérieure de cette ligne, on prendra sur $hk$ le point $e''$ correspondant à la cote 12 plus $\frac{1}{2}$ de 6, c'est-à-dire, la cote 15 de la division de AE. On aura ainsi l'épaisseur $e''f'$ au cordon; et au moyen des talus donnés, qu'on prendra au compas depuis $h$ jusqu'aux lignes correspondantes à ces talus entre $h$ et $e''$, on construira le profil du mur. La seule chose à fixer dans sa mémoire, c'est que l'extrémité antérieure $e''$ se trouve à l'intersection de $hk$ et de celle des lignes de talus dont le numéro est égal au nombre de centièmes qui exprime le talus extérieur, plus la moitié de celui qui exprime le talus intérieur; le point $f'$ se déterminant comme précédemment.

Ces constructions sont, comme on l'a déjà dit, applicables à plusieurs cas de pratique, parce qu'en supposant le mur fondé et construit selon toutes les règles de l'art, elles donnent des dimensions qu'on peut employer avec sécurité. Si l'on veut connaître maintenant les réductions d'épaisseur qui résultent des considérations physiques dont on a parlé précédemment, on s'y prendra de la manière suivante :

Par celle des divisions TC, qui répond au rapport des pesanteurs spécifiques, menez une parallèle à CB; tracez ensuite une autre ligne passant par D, et aboutissant à la division NC, sur laquelle se trouve le nombre de millièmes de la base du talus que contient sa hauteur; ce nombre étant ou donné immédiatement, ou déduit de l'angle formé par la ligne du talus naturel des terres et par l'horizon, en cherchant la valeur de cet angle exprimé en degrés, soit sur le quart de cercle

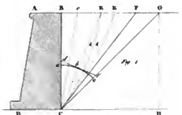
TK, soit dans la deuxième table à la fin de ce mémoire, on trouvera, à côté de cette valeur, le nombre qui indique combien la hauteur du talus contient de millièmes de la base ; ces deux lignes sont $gQ$ et DX dans l'exemple donné précédemment, et se rencontrent en Q : portez $gQ$ de A en $q$ sur AB, et tirez la ligne $q$D; son point $f''$ de rencontre avec $hk$ sera l'extrémité postérieure de la ligne supérieure du profil du mur; l'extrémité antérieure de cette ligne se déterminera comme précédemment.

Si l'on veut les épaisseurs données par l'équation (21) (1) et ses dérivées, on mènera un rayon DR du centre D au point de division du quart de cercle CH, qui répond à l'angle formé par la ligne de talus et par l'horizon, ou au nombre qui, sur le quart de cercle TK, indique combien la hauteur du talus naturel des terres contient de millièmes de la base ; de l'intersection $x$ de ce rayon avec celui des cercles concentriques qui aboutit sur TC, au nombre représentatif du rapport des pesanteurs spécifiques, on abaissera une perpendiculaire $xr$ sur DC; et la distance de D au pied de cette perpendiculaire (c'est D$r$ dans l'exemple ci-dessus) sera portée de A en $i$ sur AB : on tracera la ligne $i$D, et son intersection $f''$ avec $hk$ donnera l'extrémité postérieure de la ligne supérieure du profil; l'extrémité antérieure de cette ligne se déterminant toujours comme précédemment.

Je n'ai qu'un mot à ajouter à ce qui précède, pour dire comment on applique la *formule graphique* au cas où la surface supérieure du sol supporte un poids uniformément distribué sur toutes les parties de cette surface, comme le seraient des dalles de pierre, un trottoir, un pavé, etc. Ce cas n'ajoute aucune difficulté aux constructions précédentes, et n'y introduit aucun changement; il n'exige que l'attention de substituer au rapport de $\pi$ à $\Pi$ celui de $\pi + \frac{3G}{h}$ à $\Pi$ (2). Pour éclaircir ceci par un exemple qui tiendra lieu aux simples praticiens d'une explication complète, supposons que pour un mur dont la hauteur doit être de 10 mètres, les

(1) Cette équation, ainsi que M. de Prony le fait voir dans ses Recherches, conduit à une solution incomplète et empirique ; cependant, la formule qui renferme cette solution pourrait avoir des applications utiles ; elle aboutit, lorsqu'il s'agit de la poussée de l'eau, ou de celles des terres extrêmement coulantes, aux mêmes résultats que par les méthodes ci-dessus ; mais à mesure que les talus des terres sont plus inclinés à l'horizon, elle fournit des épaisseurs plus considérables ; on trouve en général, par cette équation ou ses dérivées, plus d'épaisseur que par les équations où l'on a égard au frottement, à la cohésion, etc., moins d'épaisseur que par celles où ces circonstances sont négligées, c'est-à-dire, des valeurs d'épaisseurs moyennes qu'on peut employer avec sécurité lorsqu'on est bien assuré que dans aucune circonstance le talus naturel que prendraient les terres, si elles n'étaient pas retenues, n'excédera celui qu'on a introduit dans le calcul.

(2) $\pi$ est la pesanteur spécifique des terres ; $\Pi$ est celle de la maçonnerie ; G est le poids que porte l'unité de la surface ; $h$ est la hauteur du mur.



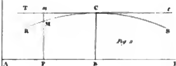
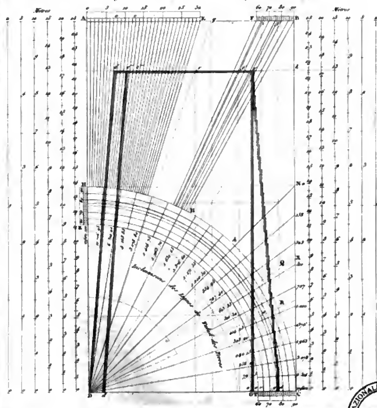




Fig. 3






terres pèsent 1500 kilogrammes le mètre cube, la maçonnerie 1875 kilog., et que la surface supérieure du terrain soit chargée de 312 kilog. $\frac{1}{2}$ par mètre carré : on aurait, en procédant comme ci-devant, cherché le nombre de centièmes contenu dans $\frac{1500}{1875}$, qui est 80, et employé la division n° 80 de FB ou de GC ; mais dans le cas où chaque mètre carré de la surface du terrain porte 312 kilog. $\frac{1}{2}$, il faut diviser le triple de ce poids, ou 937,5 par le nombre 10 de mètres que contient la hauteur du mur, ajouter le quotient 93,75 à 1500, et chercher combien il y a de centièmes dans $\frac{1593,75}{1875}$ : on trouvera qu'il y en a 85, et on emploiera la division 85 de FB ou TC, comme on aurait employé précédemment la division 80.

Je ne dis rien du cas où on éleverait un parapet au-dessus du mur : le meilleur parti à prendre, dans ce cas, est d'opérer d'abord sans avoir égard au parapet, par les procédés ci-dessus décrits, et de faire ensuite, pour trouver la réduction d'épaisseur due au poids de ce parapet, le calcul arithmétique très-simple dont la formule est donnée art. 32 des *Recherches* (1).

---

(1) Voici la régle du calcul qu'on peut suivre, dans ce cas; pour obtenir la diminution à faire à l'épaisseur trouvée par les méthodes précédentes, eu égard au parapet.

*Ajoutez le talus total du parement extérieur, ou parement vu, à la demi-épaisseur du parapet ; multipliez la somme par l'aire de la section transversale de ce parapet; divisez ce produit par un autre produit composé de deux facteurs, dont l'un est la hauteur du mur, et l'autre l'épaisseur de ce mur à sa base, diminué de la moitié du talus total de son parement intérieur; le quotient sera la diminution cherchée de l'épaisseur.*

M. de Prony appelle *talus total* d'un parement de mur, le produit, de la hauteur de ce mur depuis le dessous de la plate-forme de fondation jusqu'à l'arrasement supérieur du cordon, par le rapport entre la base et la hauteur du talus, ou, ce qui est la même chose, par la quantité qui exprime le talus par unité de mesure de la hauteur.

*Exemple de ce calcul.*

| | |
|---|---|
| La hauteur du mur est supposée égale à. . . . . . . . . . | $6^m$,000 |
| Talus du parement extérieur. . . . . . . . . . | 0 ,080 |
| Talus intérieur, ou du côté des terres. . . . . . . . . . | 0 ,065 |
| Epaisseur du mur à sa base. . . . . . . . . . | 3 ,170 |
| Hauteur du parapet. . . . . . . . . . | 1 ,000 |
| Epaisseur du parapet. . . . . . . . . . | 0 ,400 |

Il résulte de ces données, que le talus du parement intérieur est $0^m$,48, à quoi ajoutant la demi-épaisseur du parapet, la somme sera $0^m$,68, qui, multipliée par l'unité de la section du parapet, ou $0^m$,4, donne le produit de $0^m$,272. Le diviseur de ce produit est $17^m$,850. Divisant le premier produit par ce dernier, on a pour quotient $0^m$,0152, ce qui indique que, eu égard au parapet, on peut diminuer l'épaisseur du mur trouvée par les règles précédentes, tant à la base qu'au sommet, de 15 millimètres.

M. de Prony observe avec raison qu'une si faible réduction ne mérite pas qu'on y ait égard; mais il est bon de savoir la manière de la calculer; elle peut être d'ailleurs plus considérable dans certaines circonstances.

*Table qui donne l'angle formé par une ligne de talus et par l'horizon, lorsqu'on connaît le nombre des centièmes parties de la base que contient la hauteur du talus, et que cette hauteur n'excède pas le double de la base.*

*Nota.* Les hauteurs des talus sont les nombres portés dans la colonne intitulée *Tangente*. Les degrés sont des centièmes du quart de cercle, et les minutes sont les centièmes de degrés.

| Tang. | Deg. Min. | Tang. | Deg. Min. | Tang. | Deg. Min. | Tang. | Deg. Min. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0.00 | 50 | 29.51 | 100 | 50.00 | 150 | 62.57 |
| 1 | 0.64 | 51 | 30.02 | 101 | 50.31 | 151 | 62.76 |
| 2 | 1.27 | 52 | 30.53 | 102 | 50.63 | 152 | 62.95 |
| 3 | 1.91 | 53 | 31.02 | 103 | 50.94 | 153 | 63.15 |
| 4 | 2.55 | 54 | 31.52 | 104 | 51.25 | 154 | 63.34 |
| 5 | 3.18 | 55 | 32.01 | 105 | 51.55 | 155 | 63.52 |
| 6 | 3.81 | 56 | 32.50 | 106 | 51.85 | 156 | 63.71 |
| 7 | 4.45 | 57 | 32.98 | 107 | 52.15 | 157 | 63.90 |
| 8 | 5.08 | 58 | 33.46 | 108 | 52.45 | 158 | 64.08 |
| 9 | 5.72 | 59 | 33.94 | 109 | 52.74 | 159 | 64.26 |
| 10 | 6.35 | 60 | 34.40 | 110 | 53.03 | 160 | 64.44 |
| 11 | 6.97 | 61 | 34.87 | 111 | 53.32 | 161 | 64.62 |
| 12 | 7.60 | 62 | 35.33 | 112 | 53.60 | 162 | 64.79 |
| 13 | 8.23 | 63 | 35.79 | 113 | 53.88 | 163 | 64.97 |
| 14 | 8.86 | 64 | 36.24 | 114 | 54.16 | 164 | 65.14 |
| 15 | 9.48 | 65 | 36.70 | 115 | 54.44 | 165 | 65.31 |
| 16 | 10.10 | 66 | 37.14 | 116 | 54.71 | 166 | 65.48 |
| 17 | 10.72 | 67 | 37.58 | 117 | 54.98 | 167 | 65.65 |
| 18 | 11.34 | 68 | 38.02 | 118 | 55.25 | 168 | 65.82 |
| 19 | 11.95 | 69 | 38.45 | 119 | 55.51 | 169 | 65.98 |
| 20 | 12.57 | 70 | 38.88 | 120 | 55.77 | 170 | 66.15 |
| 21 | 13.18 | 71 | 39.30 | 121 | 56.03 | 171 | 66.31 |
| 22 | 13.79 | 72 | 39.72 | 122 | 56.29 | 172 | 66.47 |
| 23 | 14.39 | 73 | 40.14 | 123 | 56.54 | 173 | 66.63 |
| 24 | 15.00 | 74 | 40.56 | 124 | 56.80 | 174 | 66.79 |
| 25 | 15.60 | 75 | 40.97 | 125 | 57.05 | 175 | 66.95 |
| 26 | 16.19 | 76 | 41.37 | 126 | 57.30 | 176 | 67.11 |
| 27 | 16.79 | 77 | 41.78 | 127 | 57.54 | 177 | 67.26 |
| 28 | 17.38 | 78 | 42.18 | 128 | 57.78 | 178 | 67.42 |
| 29 | 17.97 | 79 | 41.57 | 129 | 58.02 | 179 | 67.57 |
| 30 | 18.55 | 80 | 41.95 | 130 | 58.26 | 180 | 67.72 |
| 31 | 19.14 | 81 | 42.34 | 131 | 58.49 | 181 | 67.87 |
| 32 | 19.71 | 82 | 43.72 | 132 | 58.73 | 182 | 68.01 |
| 33 | 20.29 | 83 | 44.10 | 133 | 58.60 | 183 | 68.16 |
| 34 | 20.86 | 84 | 44.18 | 134 | 58.96 | 184 | 68.31 |
| 35 | 21.43 | 85 | 44.85 | 135 | 59.42 | 185 | 68.45 |
| 36 | 22.00 | 86 | 45.22 | 136 | 59.64 | 186 | 68.60 |
| 37 | 22.56 | 87 | 45.58 | 137 | 59.86 | 187 | 68.74 |
| 38 | 23.12 | 88 | 45.94 | 138 | 60.08 | 188 | 68.88 |
| 39 | 23.63 | 89 | 46.30 | 139 | 60.30 | 189 | 69.02 |
| 40 | 24.23 | 90 | 46.65 | 140 | 60.52 | 190 | 69.16 |
| 41 | 24.77 | 91 | 47.00 | 141 | 60.73 | 191 | 69.29 |
| 42 | 25.31 | 92 | 47.35 | 142 | 60.94 | 192 | 69.43 |
| 43 | 25.85 | 93 | 47.69 | 143 | 61.15 | 193 | 69.57 |
| 44 | 26.39 | 94 | 48.03 | 144 | 61.36 | 194 | 69.70 |
| 45 | 26.92 | 95 | 48.37 | 145 | 61.56 | 195 | 69.84 |
| 46 | 27.45 | 96 | 48.70 | 146 | 61.77 | 196 | 69.97 |
| 47 | 27.97 | 97 | 49.03 | 147 | 61.97 | 197 | 70.10 |
| 48 | 28.49 | 98 | 49.36 | 148 | 62.17 | 198 | 70.23 |
| 49 | 29.01 | 99 | 49.68 | 149 | 62.37 | 199 | 70.36 |
| 50 | 29.51 | 100 | 50.00 | 250 | 62.57 | 200 | 70.49 |

*Table qui donne le nombre de millièmes parties de la base d'un talus que contient la hauteur de ce même talus, pour tous les angles, de degré en degré, qu'il peut former avec l'horizon.*

***Nota.*** Les degrés sont les centièmes du quart de cercle, et les hauteurs des talus se trouvent dans la colonne qui a pour titre *Tangente* ; ce sont les nombres qu'il faut écrire à côté des degrés correspondants sur l'arc KT de la formule graphique.

| Deg. | Tang. | Deg. | Tang. | Deg. | Tang. | Deg. | Tang. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 25 | 414 | 50 | 1000 | 75 | 2414 |
| 1 | 16 | 26 | 433 | 51 | 1032 | 76 | 2526 |
| 2 | 31 | 27 | 452 | 52 | 1065 | 77 | 2646 |
| 3 | 47 | 28 | 471 | 53 | 1099 | 78 | 2778 |
| 4 | 63 | 29 | 490 | 54 | 1134 | 79 | 2921 |
| 5 | 79 | 30 | 510 | 55 | 1171 | 80 | 3078 |
| 6 | 95 | 31 | 529 | 56 | 1209 | 81 | 3251 |
| 7 | 110 | 32 | 550 | 57 | 1248 | 82 | 3442 |
| 8 | 126 | 33 | 570 | 58 | 1289 | 83 | 3655 |
| 9 | 142 | 34 | 591 | 59 | 1332 | 84 | 3895 |
| 10 | 158 | 35 | 613 | 60 | 1376 | 85 | 4165 |
| 11 | 175 | 36 | 635 | 61 | 1423 | 86 | 4474 |
| 12 | 191 | 37 | 657 | 62 | 1471 | 87 | 4829 |
| 13 | 207 | 38 | 680 | 63 | 1522 | 88 | 5242 |
| 14 | 224 | 39 | 703 | 64 | 1576 | 89 | 5730 |
| 15 | 240 | 40 | 727 | 65 | 1632 | 90 | 6314 |
| 16 | 257 | 41 | 751 | 66 | 1691 | 91 | 7026 |
| 17 | 274 | 42 | 776 | 67 | 1753 | 92 | 7916 |
| 18 | 291 | 43 | 801 | 68 | 1819 | 93 | 9058 |
| 19 | 308 | 44 | 827 | 69 | 1889 | 94 | 10579 |
| 20 | 325 | 45 | 854 | 70 | 1963 | 95 | 12706 |
| 21 | 342 | 46 | 882 | 71 | 2041 | 96 | 15895 |
| 22 | 360 | 47 | 910 | 72 | 2125 | 97 | 21205 |
| 23 | 378 | 48 | 939 | 73 | 2215 | 98 | 31821 |
| 24 | 396 | 49 | 969 | 74 | 2311 | 99 | 63657 |
| 25 | 414 | 50 | 1000 | 75 | 2414 | 100 | Infini. |

# APPENDICE N° 3.

*Tables des dimensions principales d'épaisseur des voûtes et de leurs piédroits.*

On a annoncé dans le cours de cet ouvrage, qu'on imprimerait à la suite, des tables calculées, qui indiquent les épaisseurs à donner aux culées et piles des ponts, pour leur procurer la résistance nécessaire contre la poussée des voûtes, et dont on fait assez généralement usage dans les ponts et chaussées.

Ces tables ont été calculées d'après la formule de M. de la Hire, insérée dans les *Mémoires de l'académie des sciences*, *année* 1712; en supposant, comme l'a fait cet académicien, que le point de rupture avait lieu pour les voûtes en plein cintre, dans le milieu de la demi-voûte, c'est-à-dire, à 45 degrès au-dessus du coussinet; et que pour les arches surbaissées au tiers, et formées par trois arcs de 60 degrés, ce point de rupture avait lieu à la jonction des arcs, ce qui est le cas le plus désavantageux.

Ces deux hypothèses approchent beaucoup de la vérité; et les observations postérieures qui ont eu lieu sur les mouvements qu'ont éprouvés de grandes arches pendant leur construction, prouvent que pour ces deux espèces de voûtes les points de rupture sont bien choisis.

On a admis de plus que la partie supérieure de la voûte, comprise entre les deux joints de rupture, agissait comme un coin qui, par l'effet de la pesanteur, glissait sur ces joints, tendait à renverser les parties inférieures de la voûte, qu'on a supposé ne faire qu'un seul corps avec les piédroits ou culées, et les faisait tourner sur l'arête extérieure. On a considéré en outre les masses agissantes et résistantes comme formées d'un seul morceau : on n'a eu égard, ni au frottement qui, dans cette hypothèse, doit avoir lieu entre les joints de rupture, ni à la résistance qui provient de l'adhésion des mortiers.

La formule qui sert de base à ces tables, est fondée sur l'équilibre qui doit avoir lieu entre les parties agissantes et résistantes de la voûte. Des considérations extrêmement simples sur la manière d'agir de ces masses, eu égard aux directions suivant lesquelles elles se contre-balancent réciproquement, et à la position de leur centre de gravité, conduisent à une équation du second degré dont la solution est facile; elle détermine l'épaisseur à donner à la culée pour que le système soit eu équilibre.

Dans la plupart des ponts construits par les anciens, on observe que l'épaisseur qu'ils ont donnée aux piles et culées des ponts, est ordinairement de la moitié au quart de l'ouverture. Ces dimensions sont évidemment trop fortes. Les modernes les ont réduites du cinquième au sixième, et dans la plupart des ponts en anse de panier, qui ont été construits par les ingénieurs des ponts et chaussées, ces dimensions d'épaisseur des culées ont été établies d'après les tables de l'école, qui les font varier en raison de la hauteur des piédroits et de la charge que les voûtes ont à supporter. La solidité et la beauté d'ensemble de ces constructions modernes sont un préjugé favorable pour ces tables, et malgré qu'on ait établi ci-dessus que la formule qui leur sert de base ne soit pas fondée sur des principes rigoureux, on n'hésite cependant pas à les proposer avec confiance.

La première des deux tables a pour objet les arches en plein cintre; la seconde est relative aux voûtes surbaissées au tiers, et formées de trois arcs de 60 degrés.

La première colonne de ces tables présente le diamètre des arches; la seconde indique la hauteur des piédroits.

On entend par hauteur des piédroits, la distance depuis le dessous des fondements jusqu'à la naissance de la voûte.

La troisième colonne contient l'épaisseur des voûtes à leurs clefs : cette épaisseur est celle déterminée par la formule que l'on a indiquée dans le cours de cet ouvrage.

La quatrième colonne contient l'épaisseur des piles et culées dans le cas de l'équilibre. On a supposé les reins remplis de maçonnerie au niveau de l'extrados de la clef, et qu'il n'y a, sur la voûte, ni terre ni pavé.

On n'a point eu égard aux retraites qu'on met ordinairement aux piles et culées, ainsi il ne sera pas nécessaire d'ajouter beaucoup à l'épaisseur donnée par les tables pour être au-dessus de l'équilibre. En effet, les seules retraites sont suffisantes pour les petites arches, lorsqu'on en établit deux de 2 pouces ($0^m,055$) chacune, ainsi que c'est l'usage. A l'égard des arches de médiocre

grandeur, comme celles de 12 mètres d'ouverture, il suffira d'ajouter 6 pouces ($0^m,16$) à l'épaisseur trouvée.

Quant aux grandes arches, l'augmentation devra être de 1 pied ($0^m,326$) ou de 18 pouces ($0^m,50$).

Ces quantités jointes aux retraites et ajoutées aux épaisseurs trouvées, mettront la résistance beaucoup au-dessus de l'équilibre.

La cinquième colonne présente l'épaisseur des piles et culées, en supposant $0^m,40$ de pavé au-dessus des clefs, et que la pente transversale de ce pavé est de $\frac{1}{48}$ : cette colonne est seulement remplie, pour les arches, depuis 4 mètres jusqu'à 52 mètres de diamètre, et de 8 mètres en 8 mètres, ce qui est suffisant; car il sera facile de déterminer ce qu'il faudra ajouter aux épaisseurs de la première colonne pour avoir celles des arches chargées de pavé, en les comparant avec celles pour lesquelles le calcul a été fait.

La seconde table pour les voûtes surbaissées est entièrement semblable à celles des voûtes en plein cintre, excepté qu'elle contient deux colonnes de plus, l'une pour le petit rayon, et l'autre pour le grand.

## TABLE PREMIÈRE,

*Pour les arches en plein cintre.*

| DIAMÈTRES des arches. | | HAUTEUR des piédroits. | | ÉPAISSEUR des voûtes à leurs clefs. | | ÉPAISSEUR des piles et culées, les reins remplis au niveau de l'extrados de la clef. | | ÉPAISSEUR des piles et culées, la voûte chargée de 15p (0m,40) d'épaisseur de pavé, dont la pente serait de [illegible]. | | OBSERVATIONS. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| t. p. | m. | p. o. | m. | p. o. l. | m | p. o. l. | m | p. o. l. | m. | |
| | | 3 0 | 1,00 | | | 1 5 5 | 0,50 | | | |
| 0 3 | 1. | 4 6 | 1,50 | 1 1 3 | 0,36 | 1 7 6 | 0,55 | | | |
| | | 6 • | 2,00 | | | 1 8 9 | 0,60 | | | |
| | | 3 • | 1,00 | | | 1 10 6 | 0,65 | | | *Nota.* Les dimensions métriques portées dans les 3e, 4e et 5e colonnes, ne sont point la traduction des dimensions en anciennes mesures inscrites dans les mêmes colonnes, mais sont déduites par calcul des dimensions métriques portées dans les deux premières colonnes. |
| 1 • | 2 | 4 6 | 1,50 | 1 2 6 | 0,40 | 2 1 4 | 0,70 | | | |
| | | 6 • | 2,00 | | | 2 3 4 | 0,75 | | | |
| | | 3 • | 1 | | | 2 1 2 | 0,73 | | | |
| 1 3 | 3 | 6 • | 2 | 1 3 9 | 0,45 | 2 7 0 | 0,88 | | | |
| | | 9 • | 3 | | | 2 11 2 | 1,02 | | | |
| | | 0 • | 0 | | | 1 4 7 | 0,45 | | | |
| | | 3 • | 1 | | | 2 4 9 | 0,86 | 2 8 3 | 0,90 | |
| | | 6 • | 2 | | | 2 11 9 | 1,00 | 3 4 8 | 1,00 | |
| | | 9 • | 3 | | | 3 4 5 | 1,14 | 2 10 6 | 1,10 | |
| 2 • | 4. | 12 • | 4 | 1 5 • | 0,47 | 3 7 8 | 1,33 | | | |
| | | 15 • | 5 | | | 3 10 1 | 1,31 | | | |
| | | 18 • | 6 | | | 3 11 11 | 1,36 | | | |
| | | 21 • | 7 | | | 4 1 4 | 1,38 | | | |
| | | 24 • | 8 | | | 4 2 7 | 1,40 | | | |
| | | 6 • | 2 | | | 3 7 10 | 1,21 | | | La formule qui donne les chiffres de la troisième colonne est |
| 3 • | 6 | 9 • | 3 | 1 7 6 | 0,55 | 4 1 9 | 1,35 | | | |
| | | 12 • | 4 | | | 4 6 •1 | 1,50 | | | |
| | | 6 • | 2 | | | 4 3 1 | 1,42 | | | $= \frac{1}{28} d + 0,32.$ |
| 4 • | 8 | 9 • | 3 | 1 10 • | 0,61 | 4 9 5 | 1,60 | | | |
| | | 12 • | 4 | | | 5 3 3 | 1,75 | | | |
| | | 6 • | 2 | | | 4 10 1 | 1,61 | | | |
| 5 • | 10 | 9 • | 3 | 2 0 6 | 0,70 | 5 5 7 | 1,81 | | | |
| | | 12 • | 4 | | | 5 11 9 | 1,93 | | | |
| | | 6 • | 2 | | | 5 4 10 | 1,80 | 5 9 11 | 1,94 | |
| 6 • | 12 | 9 • | 3 | 2 3 • | 0,75 | 6 1 • | 2,02 | 6 6 9 | 2,20 | |
| | | 12 8 | 4 | | | 6 7 8 | 2,21 | 7 2 1 | 2,33 | |
| | | 0 • | 0 | | | 4 0 8 | 1,35 | | | |
| 7 • | 14 | 6 • | 2 | 2 5 6 | 0,82 | 5 11 5 | 1,97 | | | |
| | | 9 • | 3 | | | 6 8 • | 2,22 | | | |
| | | 12 • | 4 | | | 8 3 3 | 2,70 | | | |
| | | 6 • | 2 | | | 6 6 0 | 2,18 | | | |
| 8 • | 16 | 9 • | 3 | 2 8 • | 0,89 | 7 2 10 | 2,43 | | | |
| | | 12 • | 4 | | | 7 10 7 | 2,62 | | | |
| | | 15 • | 5 | | | 8 5 2 | 2,80 | | | |
| | | 6 • | 2 | | | 7 0 4 | 2,35 | | | |
| 9 • | 18 | 9 • | 3 | 2 10 6 | 0,96 | 7 9 7 | 2,60 | | | |
| | | 12 • | 4 | | | 8 5 8 | 2,82 | | | |
| | | 15 • | 5 | | | 9 0 9 | 3,00 | | | |

| DIAMÈTRE des arches. | | HAUTEUR des piédroits. | | ÉPAISSEUR des voûtes à leurs clefs. | | ÉPAISSEUR des piles et culées, les reins remplis au niveau de l'extrados de la clef. | | ÉPAISSEUR des piles et culées, la voûte chargée de 15° (0m,40) d'épaisseur de pavé, dont la pente serait de $\frac{1}{15}$. | | OBSERVATIONS. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| t. p. | m. | p. o. | m. | p. o. l. | m. | p. o. l. | m. | p. o. l. | m. | |
| 10 • | 20 | 6 • | 2 | 3 1 • | 1,07 | 7 6 8 | 2,51 | 7 11 4 | 2,65 | |
| | | 9 • | 3 | | | 8 4 3 | 2,78 | 8 9 3 | 2,93 | |
| | | 12 • | 4 | | | 9 0 7 | 3,01 | 9 6 1 | 3,17 | |
| | | 15 • | 5 | | | 9 8 1 | 3,22 | 10 1 11 | 3,38 | *Id.* |
| 11 • | 22 | 6 • | 2 | 3 3 6 | 1,10 | 8 1 0 | 2,69 | | | |
| | | 9 • | 3 | | | 8 10 10 | 2,96 | | | |
| | | 12 • | 4 | | | 9 7 6 | 3,20 | | | |
| | | 15 • | 5 | | | 10 3 2 | 3,42 | | | |
| | | 18 • | 6 | | | 10 10 2 | 3,61 | | | |
| 12 • | 24 | 6 • | 2 | 3 6 • | 1,17 | 8 7 4 | 2,86 | | | |
| | | 9 • | 3 | | | 9 5 4 | 3,14 | | | |
| | | 12 • | 4 | | | 10 2 2 | 3,39 | | | |
| | | 15 • | 5 | | | 10 10 2 | 3,61 | | | |
| | | 18 • | 6 | | | 11 5 6 | 3,82 | | | |
| 13 • | 26 | 6 • | 2 | 3 8 6 | 1,24 | 9 1 10 | 3,04 | | | |
| | | 9 • | 3 | | | 9 11 9 | 3,32 | | | |
| | | 12 • | 4 | | | 10 9 0 | 3,58 | | | |
| | | 15 • | 5 | | | 11 5 3 | 3,81 | | | |
| | | 18 • | 6 | | | 12 0 10 | 4,02 | | | |
| 14 • | 28 | 9 • | 3 | 3 11 • | 1,32 | 10 5 11 | 3,49 | 10 10 4 | 3,62 | |
| | | 12 • | 4 | | | 11 3 7 | 3,76 | 11 7 11 | 3,88 | |
| | | 15 • | 5 | | | 12 0 1 | 4,00 | 12 4 8 | 4,13 | |
| | | 18 • | 6 | | | 12 7 11 | 4,23 | 13 0 8 | 4,35 | |
| | | 21 • | 7 | | | 13 3 1 | 4,41 | 13 8 1 | 4,55 | |
| 15 • | 30 | 9 • | 3 | 4 1 6 | 1,39 | 11 2 4 | 3,73 | | | |
| | | 12 • | 4 | | | 11 11 6 | 4,00 | | | |
| | | 15 • | 5 | | | 12 8 1 | 4,22 | | | |
| | | 18 • | 6 | | | 13 4 0 | 4,44 | | | |
| | | 21 • | 7 | | | 13 11 4 | 4,65 | | | |
| 16 • | 32 | 9 • | 3 | 4 4 • | 1,46 | 11 7 0 | 3,86 | | | |
| | | 12 • | 4 | | | 12 4 8 | 4,12 | | | |
| | | 15 • | 5 | | | 13 1 7 | 4,37 | | | |
| | | 18 • | 6 | | | 13 9 9 | 4,60 | | | |
| | | 21 • | 7 | | | 14 5 4 | 5,80 | | | |
| 17 • | 34 | 9 • | 3 | 4 6 6 | 1,53 | 12 1 5 | 4,03 | | | |
| | | 12 • | 4 | | | 12 11 2 | 4,32 | | | |
| | | 15 • | 5 | | | 13 7 3 | 4,53 | | | |
| | | 18 • | 6 | | | 14 4 7 | 4,79 | | | |
| | | 21 • | 7 | | | 15 0 5 | 5,00 | | | |
| 18 • | 36 | 9 • | 3 | 4 9 • | 1,60 | 12 7 8 | 4,21 | 12 10 11 | 4,32 | |
| | | 12 • | 4 | | | 13 5 8 | 4,42 | 13 9 • | 4,58 | |
| | | 15 • | 5 | | | 14 2 10 | 4,76 | 14 6 4 | 4,84 | |
| | | 18 • | 6 | | | 14 11 4 | 4,98 | 15 3 1 | 5,08 | |
| | | 21 • | 7 | | | 15 7 5 | 5,20 | 15 11 3 | 5,30 | |
| 19 • | 38 | 9 • | 3 | 4 11 6 | 1,65 | 13 2 0 | 4,39 | | | |
| | | 12 • | 4 | | | 14 0 1 | 4,66 | | | |
| | | 15 • | 5 | | | 14 9 5 | 4,80 | | | |
| | | 18 • | 6 | | | 15 6 2 | 5,16 | | | |
| | | 21 • | 7 | | | 16 2 3 | 5,35 | | | |

| DIAMÈTRE des arches. | | HAUTEUR des piédroits. | | ÉPAISSEUR des voûtes à leurs clefs. | | ÉPAISSEUR des piles et culées, les reins remplis au niveau de l'extrados de la clef. | | ÉPAISSEUR des piles et culées, la voûte chargée de 15° ($0^m$,40) d'épaisseur de pavé, dont la pente serait de $\frac{1}{48}$ | | OBSERVATIONS |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| I. p. | m. | p. o. | m. | p. o. l. | m. | p. o. l. | m. | p. o. l. | m. | |
| | | 9 » | 3 | | | 13 8 4 | 4,55 | | | |
| | | 12 | 4 | | | 14 6 5 | 4,84 | | | |
| 20 » | 40 | 15 » | 5 | 5 2 » | 1,72 | 15 4 0 | 5,10 | | | |
| | | 18 » | 6 | | | 16 0 10 | 5,35 | | | |
| | | 21 » | 7 | | | 16 9 2 | 5,58 | | | *Id.* |
| | | 9 » | 3 | | | 14 2 8 | 4,74 | | | |
| | | 12 » | 4 | | | 15 0 10 | 5,00 | | | |
| 21 » | 42 | 15 » | 5 | 5 4 6 | 1,80 | 15 10 6 | 5,29 | | | |
| | | 18 » | 6 | | | 16 7 5 | 5,54 | | | |
| | | 21 » | 7 | | | 17 3 11 | 5,77 | | | |
| | | 9 » | 3 | | | 14 8 [illegible] | 4,91 | 14 11 2 | 4,98 | |
| | | 12 » | 4 | | | 15 7 3 | 5,20 | 15 9 7 | 5,26 | |
| 22 » | 44 | 15 » | 5 | 5 7 » | 1,86 | 16 4 11 | 5,46 | 16 7 5 | 5,54 | |
| | | 18 » | 6 | | | 17 2 1 | 5,72 | 17 4 8 | 5,79 | |
| | | 21 » | 7 | | | 17 10 8 | 5,96 | 18 1 5 | 6,04 | |
| | | 9 » | 3 | | | 15 3 2 | 5,08 | | | |
| | | 12 » | 4 | | | 16 1 7 | 5,42 | | | |
| 23 » | 46 | 15 » | 5 | 5 9 6 | 1,93 | 16 11 4 | 5,65 | | | |
| | | 18 » | 6 | | | 17 3 8 | 5,76 | | | |
| | | 21 » | 7 | | | 18 5 5 | 6,15 | | | |
| | | 9 » | 3 | | | 15 9 6 | 5,26 | | | |
| | | 12 » | 4 | | | 16 7 9 | 5,55 | | | |
| 24 » | 48 | 15 » | 5 | 6 0 » | 2,00 | 17 5 6 | 5,81 | | | |
| | | 18 » | 6 | | | 18 2 11 | 6,08 | | | |
| | | 21 » | 7 | | | 18 11 8 | 6,32 | | | |
| | | 9 » | 3 | | | 16 3 8 | 5,43 | | | |
| | | 12 » | 4 | | | 17 2 3 | 5,73 | | | |
| 25 » | 50 | 15 » | 5 | 6 2 6 | 2,07 | 18 0 3 | 6,00 | | | |
| | | 18 » | 6 | | | 18 9 8 | 6,26 | | | |
| | | 21 » | 7 | | | 19 6 8 | 6,50 | | | |
| | | 9 » | 3 | | | 16 10 1 | 5,61 | 16 11 3 | 5,64 | |
| | | 12 » | 4 | | | 17 8 8 | 5,90 | 17 10 0 | 5,94 | |
| 26 » | 52 | 15 » | 5 | 6 5 » | 2,14 | 18 6 9 | 6,18 | 18 8 2 | 6,22 | |
| | | 18 » | 6 | | | 19 4 4 | 6,45 | 19 5 9 | 6,48 | |
| | | 21 » | 7 | | | 20 0 5 | 6,70 | 20 2 11 | 6,74 | |
| | | 9 » | 3 | | | 17 4 2 | 5,78 | | | |
| | | 12 » | 4 | | | 18 2 11 | 6,08 | | | |
| 27 » | 54 | 15 » | 5 | 6 7 6 | 2,21 | 19 1 1 | 6,35 | | | |
| | | 18 » | 6 | | | 19 10 8 | 6,62 | | | |
| | | 21 » | 7 | | | 20 7 11 | 6,88 | | | |
| | | 0 » | 0 | | | 14 10 7 | 4,96 | | | |
| | | 3 » | 1 | | | 15 11 2 | 5,31 | | | |
| | | 6 » | 2 | | | 16 11 2 | 5,64 | | | |
| | | 9 » | 3 | | | 17 10 5 | 5,95 | | | |
| 28 » | 58 | 12 » | 4 | 6 10 » | 2,27 | 18 9 3 | 6,24 | | | |
| | | 15 » | 5 | | | 19 7 4 | 6,53 | | | |
| | | 18 » | 6 | | | 20 5 2 | 6,80 | | | |
| | | 21 » | 7 | | | 21 2 5 | 7,06 | | | |
| | | 24 » | 8 | | | 21 11 4 | 7,31 | | | |

## TABLE SECONDE,

***Pour les arches surbaissées au tiers (anses de panier à trois centres).***

Le petit rayon étant $0^m,272\,d$, et le grand rayon $0^m,728\,d$.

| DIAMÈTRE des arches. | | HAUTEUR des piédroits. | | PETIT RAYON | | GRAND RAYON | | ÉPAISSEUR des voûtes à leurs clefs. | | ÉPAISSEUR des piles et culées, les reins remplis au niveau de l'extrados de la clef. | | ÉPAISSEUR des piles et culées, la voûte chargée de 15° ($0^m,40$) d'épaisseur de pavé, dont la pente serait de [illegible]. | | OBSERVATIONS |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1. p. | m. | p. o. | m. | p. o. l. | m. | p. o. l. | m. | p. o. l. | m. | p. o. l. | m. | p. o. l. | m. | |
| 0 3 | 1 | 3 o<br>4 6<br>6 · | 1,00<br>1,50<br>2,00 | 0 9 3½ | 0,370 | 2 2 2½ | 0,728 | 1 1 9 | 0,38 | 1 6 [illegible]<br>1 8 4<br>1 9 5 | 0,51<br>0,58<br>0,60 | | | *Nota.* Les dimensions métriques portées dans les cinq dernières colonnes, ne sont point la traduction des dimensions en anciennes mesures inscrites dans les mêmes colonnes, mais bien les dimensions déduites, par calcul, des dimensions métriques portées dans les deux premières colonnes de gauche. |
| 1 · | 2 | 3 ·<br>4 6<br>6 · | 1,00<br>1,50<br>2,00 | 1 7 7½ | 0,510 | 4 4 4½ | 1,456 | 1 3 0 | 0,44 | 2 3 5<br>2 6 9<br>2 9 1 | 0,76<br>0,85<br>0,92 | | | |
| 1 3 | 3 | 3 ·<br>6 ·<br>9 · | 1<br>2<br>3 | 2 4 11 | 0,820 | 6 7 1 | 2,181 | 1 5 6 | 0,49 | 2 8 2<br>3 3 4<br>3 7 3 | 0,89<br>1,09<br>1 20 | | | |
| 2 · | 4 | 0 ·<br>3 ·<br>6 ·<br>9 ·<br>12 ·<br>15 ·<br>18 ·<br>21 ·<br>24 · | 0<br>1<br>2<br>3<br>4<br>5<br>6<br>7<br>8 | 3 3 2½ | 1,180 | 8 8 9½ | 2,920 | 1 7 4 | 0,54 | 1 8 10<br>3 2 4<br>3 11 3<br>4 4 7<br>4 8 1<br>4 10 9<br>5 0 7<br>5 2 1<br>5 3 3 | 0,58<br>1,06<br>1,31<br>1,46<br>1,57<br>1,60<br>1,68<br>1,72<br>1,75 | 3 9 2<br>4 8 8<br>5 3 11 | 1,25<br>1,57<br>1,77 | |
| 3 · | 6 | 6 ·<br>9 ·<br>12 · | 2<br>3<br>4 | 4 10 10 | 1,63 | 13 1 2 | 4,370 | 1 10 10 | 0,63 | 4 10 3<br>5 5 5<br>5 10 6 | 1,62<br>1,81<br>1,95 | | | |
| 3 3 | 7 | 6 · | 2 | 5 8 7 | 1,900 | 15 3 4 | 5,100 | 2 0 8 | 0,69 | 5 5 4 | 1,81 | | | La formule qui donne les chiffres de la 5e colonne est $e = \frac{1}{20} d + 0,35$. |
| 4 · | 8 | 6 ·<br>9 ·<br>12 · | 2<br>3<br>4 | 6 5 5 | 2,180 | 17 5 7 | 5,820 | 2 0 7 | 0,74 | 5 8 5<br>6 5 0<br>6 11 5 | 1,94<br>2,14<br>2,32 | | | |
| 5 · | 10 | 6 ·<br>9 ·<br>12 · | 2<br>3<br>4 | 8 2 0½ | 2,720 | 21 9 11½ | 7,280 | 0 6 0 | 0,83 | 6 5 9<br>7 3 7<br>7 11 2 | 2,16<br>2,43<br>2,64 | | | |
| 6 · | 12 | 6 ·<br>9 ·<br>12 · | 2<br>3<br>4 | 9 9 8 | 3,26 | 25 2 4 | 8,74 | 2 10 1 | 0,95 | 7 3 1<br>8 2 0<br>8 10 8 | 2,42<br>2,72<br>2,96 | 8 0 0<br>9 0 3<br>9 9 11 | 2,67<br>3,00<br>3,27 | |
| 7 · | 14 | 6 ·<br>9 ·<br>12 · | 2<br>3<br>4 | 11 5 3 | 3,81 | 30 6 9 | 10,19 | 3 2 0 | 1,05 | 8 0 0<br>8 11 8<br>9 8 11 | 2,67<br>3,15<br>3,24 | | | |
| 8 · | 16 | 6 ·<br>9 ·<br>12 ·<br>15 · | 2<br>3<br>4<br>5 | 13 0 10 | 4,35 | 34 11 2 | 8,65 | 3 5 2 | 1,14 | 8 8 2<br>9 8 6<br>10 6 8<br>11 3 2 | 2,89<br>3,23<br>3,52<br>3,75 | | | |
| 9 · | 18 | 6 ·<br>9 ·<br>12 ·<br>15 · | 2<br>3<br>4<br>5 | 14 8 6 | 4,30 | 39 3 6 | 13,10 | 3 8 8 | 1,24 | 9 4 7<br>10 5 5<br>11 4 3<br>12 1 5 | 3,12<br>3,48<br>3,78<br>4,04 | | | |
| 10 · | 20 | 6 ·<br>9 ·<br>12 ·<br>15 · | 2<br>3<br>4<br>5 | 16 4 1 | 5,44 | 43 7 11 | 14,66 | 4 0 6 | 1,35 | 10 1 0<br>11 2 5<br>12 1 10<br>12 11 8 | 3,35<br>3,73<br>4,05<br>4,32 | 10 9 0<br>11 11 5<br>12 11 8<br>13 10 2 | 3,58<br>3,94<br>4,32<br>4,61 | |

| Diamètre des arches. | | Hauteur des piédroits. | | Petit rayon. | | Grand rayon. | | Épaisseur des voûtes à leurs clefs | | Épaisseur des piles et culées, les reins remplis au niveau de l'extrados de la clef. | | Épaisseur des piles et culées, la voûte chargée de 15° 0m,40 d'épaisseur de pavé dont la pente serait de 1/48. | | Observations. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| t. p. | m | p. o | m. | p. o. l. | m. | p. o. l. | m. | p. o. l. | m. | p. o. l. | m. | p. o. l. | m. | |
| | | 6 • | 2 | | | | | | | 10 9 2 | 3.58 | | | |
| | | 6 • | 3 | | | | | | | 11 11 0 | 3.97 | | | |
| 11 • | 22 | 12 • | 4 | 17 11 8¼ | 6,00 | 48 0 3¼ | 16,00 | 4 4 0 | 1,44 | 12 10 11 | 4,30 | | | |
| | | 15 • | 5 | | | | | | | 13 9 3 | 4,50 | | | |
| | | 18 • | 6 | | | | | | | 14 6 3 | 4 84 | | | |
| | | 6 • | 2 | | | | | | | 11 5 7 | 3 82 | | | Id |
| | | 6 • | 3 | | | | | | | 12 7 10 | 4 20 | | | |
| 12 • | 24 | 12 • | 4 | 19 7 3½ | 6,52 | 52 4 8½ | 17,48 | 4 7 6 | 1,54 | 13 8 2 | 4,55 | | | |
| | | 15 • | 5 | | | | | | | 14 6 11 | 4,65 | | | |
| | | 18 • | 6 | | | | | | | 15 4 5 | 5,12 | | | |
| | | 6 • | 2 | | | | | | | 12 1 8 | 4,04 | | | |
| | | 9 • | 3 | | | | | | | 13 4 4 | 4,45 | | | |
| 13 • | 26 | 12 • | 4 | 21 2 11 | 7,27 | 56 9 1 | 18,93 | 4 11 6 | 1,65 | 14 5 0 | 4,80 | | | |
| | | 15 • | 5 | | | | | | | 15 4 4 | 5,12 | | | |
| | | 18 • | 6 | | | | | | | 16 0 3 | 5,39 | | | |
| | | 9 • | 3 | | | | | | | 14 1 0 | 4 69 | 14 9 1 | 4,92 | |
| | | 12 • | 4 | | | | | | | 15 2 3 | 5,00 | 15 10 10 | 5,30 | |
| 14 • | 28 | 15 • | 5 | 22 10 6 | 7,62 | 61 1 6 | 20,38 | 5 3 0 | 1,75 | 16 1 10 | 5,38 | 16 11 0 | 5,64 | |
| | | 18 • | 6 | | | | | | | 17 0 3 | 5,66 | 17 9 11 | 5,94 | |
| | | 21 • | 7 | | | | | | | 17 9 7 | 5,79 | 18 7 9 | 6,21 | |
| | | 9 • | 3 | | | | | | | 14 9 4 | 4,90 | | | |
| | | 12 • | 4 | | | | | | | 15 11 8 | 5,32 | | | |
| 15 • | 30 | 15 • | 5 | 24 6 1½ | 8,16 | 65 5 10½ | 21,84 | 5 6 9 | 1,85 | 16 10 9 | 5,63 | | | |
| | | 18 • | 6 | | | | | | | 17 9 8 | 5,93 | | | |
| | | 21 • | 7 | | | | | | | 18 7 4 | 6,20 | | | |
| | | 9 • | 3 | | | | | | | 15 5 2 | 5,16 | | | |
| | | 12 • | 4 | | | | | | | 16 7 0 | 5,52 | | | |
| 16 • | 32 | 15 • | 5 | 26 1 8½ | 8,70 | 69 10 3½ | 17,30 | 5 10 0 | 1,95 | 17 7 3 | 5,86 | | | |
| | | 18 • | 6 | | | | | | | 18 6 5 | 6,17 | | | |
| | | 21 • | 7 | | | | | | | 19 4 6 | 6,45 | | | |
| | | 9 • | 3 | | | | | | | 16 1 8 | 5.38 | | | |
| | | 12 • | 4 | | | | | | | 17 3 8 | 5,77 | | | |
| 17 • | 34 | 15 • | 5 | 27 9 4 | 9,25 | 74 2 8 | 24,75 | 6 1 10 | 2,05 | 18 4 5 | 6,12 | | | |
| | | 18 • | 6 | | | | | | | 19 3 10 | 6.43 | | | |
| | | 21 • | 7 | | | | | | | 20 2 4 | 6,72 | | | |
| | | 9 • | 3 | | | | | | | 16 9 10 | 5,60 | 17 4 11 | 5,80 | |
| | | 12 • | 4 | | | | | | | 18 0 2 | 6,00 | 18 7 8 | 6,21 | |
| 18 • | 36 | 15 • | 5 | 29 4 11½ | 9,80 | 78 7 0½ | 26,20 | 6 5 5 | 2,15 | 19 1 1 | 6,34 | 19 9 1 | 6,58 | |
| | | 18 • | 6 | | | | | | | 20 0 11 | 6,62 | 20 9 4 | 6,92 | |
| | | 21 • | 7 | | | | | | | 20 11 8 | 6,98 | 21 8 5 | 7,22 | |
| | | 9 • | 3 | | | | | | | 17 6 2 | 5.83 | | | |
| | | 12 • | 4 | | | | | | | 18 8 8 | 4,24 | | | |
| 19 • | 38 | 15 • | 5 | 31 0 7 | 10,34 | 82 11 5 | 27.66 | 6 9 0 | 2,25 | 19 10 0 | 6,60 | | | |
| | | 18 • | 6 | | | | | | | 20 10 2 | 5,95 | | | |
| | | 21 • | 7 | | | | | | | 21 9 1 | 7,20 | | | |
| | | 9 • | 3 | | | | | | | 18 2 2 | 6,06 | | | |
| | | 12 • | 4 | | | | | | | 19 4 11 | 6,46 | | | |
| 20 • | 40 | 15 • | 5 | 32 8 2 | 10,88 | 87 3 10 | 29,10 | 7 0 6 | 2,35 | 20 6 4 | 6,83 | | | |
| | | 18 • | 6 | | | | | | | 21 6 9 | 7,18 | | | |
| | | 21 • | 7 | | | | | | | 22 6 1 | 7,49 | | | |

| DIAMÈTRE des arches. | | HAUTEUR des piédroits. | | PETIT RAYON. | | GRAND RAYON. | | ÉPAISSEUR des voûtes à leurs clefs. | | ÉPAISSEUR des piles et culées, les reins remplis au niveau de l'extrados de la clef. | | ÉPAISSEUR des piles et culées, la voûte chargée de 15° 0m,40 d'épaisseur de pavé, dont la pente serait de 1/40. | | OBSERVATIONS. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| t. p. | m. | p. o. | m. | p. o. l. | m. | p. o. l. | m. | p. o. l. | m. | p. o. l. | m. | p. o. l. | m. | |
| 21 0 | 42 | 9 0<br>12 2<br>15 0<br>18 0<br>21 0 | 3<br>4<br>5<br>6<br>7 | 36 3 9½ | 11,67 | 91 8 2½ | 30,57 | 7 4 4 | 2,45 | 18 10 5<br>20 1 5<br>21 3 1<br>22 3 9<br>23 3 5 | 6,28<br>6,60<br>7,08<br>7,43<br>7,75 | | | Id. |
| 22 0 | 44 | 9 0<br>12 0<br>15 2<br>18 0<br>21 0 | 3<br>4<br>5<br>6<br>7 | 35 11 4½ | 12,00 | 96 0 7½ | 32,00 | 7 8 0 | 2,55 | 19 6 2<br>20 9 10<br>21 11 8<br>23 0 6<br>24 0 5 | 6,51<br>6,93<br>7,32<br>7,67<br>8,02 | 20 0 0<br>21 4 6<br>22 6 9<br>23 2 11<br>23 8 2 | 6,66<br>7,11<br>7,51<br>7,88<br>8,08 | |
| 23 0 | 46 | 9 0<br>12 0<br>15 0<br>18 0<br>21 0 | 3<br>4<br>5<br>6<br>7 | 37 6 11½ | 12,51 | 100 5 1½ | 33,40 | 7 11 6 | 2,65 | 20 2 8<br>21 6 0<br>22 8 1<br>23 9 2<br>24 9 4 | 6,73<br>7,16<br>7,55<br>7,91<br>8,19 | | | |
| 24 0 | 48 | 9 0<br>12 0<br>15 0<br>18 0<br>21 0 | 3<br>4<br>5<br>6<br>7 | 39 2 7½ | 13,04 | 104 9 4½ | 34,96 | 8 3 4 | 2,75 | 20 10 11<br>22 2 4<br>23 4 9<br>24 6 0<br>25 6 4 | 6,96<br>7,39<br>7,79<br>8,30<br>8,52 | | | |
| 25 0 | 50 | 9 0<br>12 0<br>15 0<br>18 0<br>21 0 | 3<br>4<br>5<br>6<br>7 | 40 10 2½ | 13,60 | 109 1 9½ | 36,40 | 8 2 3 | 2,85 | 21 6 11<br>22 10 6<br>24 1 0<br>25 2 6<br>26 3 1 | 7,18<br>7,61<br>8,02<br>8,36<br>8,71 | | | |
| 26 0 | 52 | 9 0<br>12 0<br>15 0<br>18 0<br>21 0 | 3<br>4<br>5<br>6<br>7 | 42 5 9½ | 14,14 | 113 6 2½ | 37,86 | 8 10 6 | 2,95 | 22 3 0<br>23 6 9<br>24 9 5<br>25 11 1<br>26 11 1 | 7,41<br>7,84<br>8,25<br>8,63<br>8,97 | 22 8 7<br>24 0 8<br>25 5 7<br>26 3 6<br>27 4 6 | 7,56<br>8,01<br>8,48<br>8,75<br>9,17 | |
| 27 0 | 54 | 9 0<br>12 0<br>15 0<br>18 0<br>21 0 | 3<br>4<br>5<br>6<br>7 | 44 1 5 | 14,70 | 117 10 7 | 39,30 | 9 2 4 | 3,05 | 22 11 3<br>24 3 1<br>25 5 11<br>26 7 10<br>27 8 9 | 7,64<br>8,08<br>8,49<br>8,87<br>9,23 | | | |
| 28 0 | 56 | 0 0<br>3 0<br>6 0<br>9 0<br>12 0<br>15 0<br>18 0<br>21 0<br>24 0 | 0<br>1<br>2<br>3<br>4<br>5<br>6<br>7<br>8 | 45 9 0½ | 15,24 | 122 2 11½ | 40,76 | 9 5 9 | 3,15 | 18 11 8<br>20 7 6<br>22 1 11<br>23 7 1<br>24 11 1<br>26 2 1<br>27 4 1<br>28 4 3<br>29 5 7 | 6,32<br>6,86<br>7,38<br>7,85<br>8,30<br>8,69<br>9,10<br>9,17<br>9,81 | | | |
| 29 0 | 58 | 12 0 | 4 | 47 4 8 | 15,78 | 126 2 4 | 42,22 | 9 9 0 | 3,25 | 25 6 10 | 8,51 | | | |
| 30 0 | 60 | 12 0 | 4 | 49 2 4 | 16,32 | 130 11 9 | 43,68 | 10 0 0 | 3,35 | 26 2 9 | 8,73 | | | |
| 35 0 | 70 | 12 0 | 4 | 57 2 4 | 19,24 | 152 9 8 | 50,16 | 11 6 0 | 3,85 | 29 7 3 | 9,86 | | | |
| 40 0 | 80 | 12 0 | 4 | 65 4 4 | 21,76 | 174 7 8 | 58,24 | 13 0 0 | 4,35 | 32 11 5 | 10,91 | | | |
| 45 0 | 90 | 12 0 | 4 | 73 6 5 | 24,48 | 196 5 7 | 65,52 | 14 0 0 | 4,85 | 35 11 4 | 11,07 | | | |
| 50 0 | 100 | 12 0 | 4 | 81 8 5 | 27,20 | 218 3 7 | 72,80 | 15 0 0 | 5,35 | 38 11 3 | 12,97 | | | |

FIN DU TOME PREMIER,

COMPRENANT LES LEÇONS SUR LES MATÉRIAUX, LES MAÇONNERIES ET LES FONDATIONS EN GÉNÉRAL, LES ROUTES, LES CHEMINS DE FER, LES VIADUCS ET PONTS EN MAÇONNERIE, EN BOIS ET EN MÉTAL, LES PONTS SUSPENDUS ET LES PONTS MOBILES.

# PROGRAMME

OU

RÉSUMÉ DES LEÇONS

D'UN

# COURS DE CONSTRUCTIONS,

AVEC DES APPLICATIONS TIRÉES SPÉCIALEMENT

DE L'ART DE L'INGÉNIEUR DES PONTS ET CHAUSSÉES;

OUVRAGE DE FEU M.-J. SGANZIN.

Quatrième Édition,

ENRICHIE D'UN ATLAS VOLUMINEUX, ENTIÈREMENT REFONDUE

PAR M. REIBELL,

Ingénieur en chef de première classe des ponts et chaussées, directeur des travaux maritimes, officier de la Légion d'honneur.

*Agissant comme mandataire de la famille de feu M. Sganzin.*




APPENDICE N° 4 AU TOME 1.

## COLLECTION DE TABLES,

PAR LÉON LALANNE,

Ingénieur des ponts et chaussées.

PARIS. — IMPRIMERIE DE FAIN ET THUNOT,
IMPRIMEURS DE L'UNIVERSITÉ ROYALE DE FRANCE,
rue Racine, 28, près de l'Odéon.

# COLLECTION DE TABLES

POUR ABRÉGER LES CALCULS RELATIFS

## A LA RÉDACTION DES PROJETS DE ROUTES

ET DE CHEMINS DE TOUTES LARGEURS;

**PAR LÉON LALANNE,**

Ingénieur des ponts et chaussées.

---

## APPENDICE N° 4 AU TOME 1

DE LA QUATRIÈME ÉDITION DU COURS DE CONSTRUCTIONS DE FEU M.-J. SGANZIN, ENTIÈREMENT REFONDUE

**PAR M. REIBELL,**

Ingénieur en chef de première classe des ponts et chaussées, directeur des travaux maritimes,
officier de la Légion d'honneur

PARIS.

CARILIAN-GOEURY ET Vve DALMONT, ÉDITEURS,

LIBRAIRES DES CORPS ROYAUX DES PONTS ET CHAUSSÉES ET DES MINES,

Quai des Augustins, nos 39 et 41.

1842.

# TABLE DES MATIÈRES.

## FAUTE A CORRIGER.

Dans la table de triangles de la page 32, les mots *rampe*, *pente* placés en dessous des nombres 0,000, 0,025, 0,075, etc., qui indiquent l'*inclinaison par mètre*, doivent être remplacés l'un par l'autre : on lira donc *pente* au lieu de *rampe* et réciproquement.

# AVERTISSEMENT.

Lorsque M. l'ingénieur en chef Reibell eut commencé la publication de la nouvelle édition du *Cours de constructions* de feu M. Sganzin, plusieurs personnes témoignèrent le désir de trouver dans cet ouvrage une exposition détaillée des méthodes qui ont été employées depuis quelques années pour abréger la rédaction des projets de routes. Cependant la nécessité de concentrer un grand nombre de faits importants dans un cadre restreint ne permettait pas de donner ce développement spécial à une partie du livre qui aurait été hors de proportion avec le reste. De plus, la rédaction d'un travail de ce genre exigeant des calculs longs et pénibles, les résultats de ces calculs ne pouvaient paraître que postérieurement à la publication du corps de l'ouvrage.

M. Reibell, auquel fut soumis le projet de ce travail, dont nous nous étions chargé, à la prière des éditeurs de la nouvelle édition du *Cours de constructions*, voulut bien nous autoriser à rédiger l'APPENDICE que nous publions aujourd'hui. Nous devons lui exprimer ici toute notre reconnaissance d'avoir été agréé par lui comme collaborateur, même pour une si faible part.

La collection de tables qui suit est la plus nombreuse et la plus complète, mais non la plus détaillée, qui ait paru jusqu'à ce jour sur le même sujet. Il a semblé qu'il valait mieux l'étendre au plus grand nombre possible de cas différents que de la développer, entre des limites plus restreintes, pour des valeurs d'éléments variables plus rapprochées les unes des autres. Ainsi ces tables ne donnent les surperficies de déblais et de remblais, et les largeurs prises par les routes, que pour des cotes de $0^m,20$ en $0^m,20$ sur l'axe, et pour des inclinaisons du terrain naturel de 0,050 en 0,050. Mais aussi elles s'étendent aux gabarits compris entre 4 et 12 mètres, et notamment à ceux de 4, 5, 6 et 11 mètres qui n'avaient point encore été calculés. Les tables des largeurs, celles qui servent à abréger les calculs relatifs au règlement des pentes et rampes et au pavage, sont aussi complétement inédites.

Pour nous justifier d'avoir procédé ainsi, nous n'avons besoin que de citer un passage de l'ouvrage auquel notre travail fait suite : « ..... Le bas prix des déblais et » des remblais, le peu d'influence qu'auraient sur un tracé des erreurs d'évaluations » dans les cubages, les causes d'inexactitudes et d'erreurs bien plus graves qui tien- » nent à la nature variable des terrains à déblayer, doivent déterminer à recourir

» aux méthodes les plus courtes pour calculer sommairement les déblais et rem-
» blais, afin d'avoir plus de temps à donner aux autres questions plus essentielles
» du tracé des routes. » (Tome I, page 221.)

Il est donc certain que, si quelques-unes de nos tables ne sont pas assez développées pour convenir à la rédaction détaillée des projets rédigés par les ingénieurs, qui, d'ailleurs, ont entre les mains la collection de celles que l'administration des ponts et chaussées a fait publier, elles pourront fournir des indications utiles pour l'étude des avant-projets; et elles suffiront à toutes les exigences du service des agents-voyers, dans les projets qui concernent les chemins vicinaux de petite communication.

Les nombres des tables des superficies pour les gabarits de 8 et de 10 mètres, et ceux de la table de triangles ont été empruntés aux tables lithographiées calculées sous la direction de M. l'ingénieur en chef Coriolis. Toutes nos autres tables ont été calculées directement et vérifiées avec soin.

*L'instruction pratique* qui commence notre appendice a été mise à la portée des employés les moins familiarisés avec la science du calcul. Nous renvoyons d'ailleurs à l'ouvrage de Sganzin pour les développements relatifs à la cubature des solides de déblai et de remblai, dont nous n'avions pas à nous occuper.

Enfin, nous avons consacré quatre *notes* à des développements qui nous ont paru de nature à intéresser quelques lecteurs.

# INSTRUCTION PRATIQUE

## POUR L'USAGE DES TABLES.

1. L'un des éléments les plus importants du projet relatif à l'ouverture d'une voie de communication d'une nature quelconque, est la détermination du volume des terres à mettre en mouvement pour l'exécution de ce projet.

Éléments nécessaires au calcul des terrassements.

Cette détermination exige un calcul spécial, connu sous le nom de *calcul des terrassements*.

2. Lorsque l'on a rapporté le profil en long pris sur le terrain naturel suivant l'axe de la voie de communication à ouvrir, et que l'on a arrêté le nouveau profil en long que l'on veut donner à cette voie; on connait, en chacun des points du tracé, la hauteur dont cette voie, après l'exécution des terrassements, sera exhaussée au-dessus ou abaissée au-dessous du terrain naturel. Les nombres qui expriment en mètres et subdivisions du mètre les exhaussements et les abaissements portent respectivement les noms de *cotes de déblai* et de *cotes de remblai*.

3. Des profils en travers, perpendiculaires à l'axe du profil en long, font connaître la forme du terrain naturel à gauche et à droite de cet axe; et lorsque l'on a adopté un profil en travers ou gabarit particulier pour la voie de communication à ouvrir, en dessinant ce gabarit dans la position indiquée par la cote de déblai ou de remblai, sur les figures des profils en travers du terrain naturel, on obtient une représentation graphique des *superficies de déblai et de remblai* qui correspondent à ces profils.

C'est de la mesure de ces superficies que l'on déduit immédiatement les *volumes de déblai et de remblai* par des calculs très-simples.

4. Mais il arrive très-souvent qu'il n'est pas nécessaire de dessiner les profils en travers du terrain naturel et de l'ouvrage projeté pour connaître la valeur des superficies de déblai et de remblai.

Il suffit, pour cela, que le terrain naturel ait une inclinaison sensiblement uniforme sur la largeur occupée par la moitié de la route, soit à gauche, soit à droite de l'axe. Car on a des *formules* ou règles générales au moyen desquelles on trouve les superficies de déblai et de remblai qui correspondent à une cote et à une inclinaison du terrain naturel déterminées.

Ces formules elles-mêmes ont été réduites, de différentes manières, en tables dont l'usage pourra souvent épargner un temps considérable, puisque l'on se trouve dispensé de dessiner les profils en travers, travail qui n'exige jamais moins d'un quart-d'heure par profil.

Disposition et usage des tables des superficies de déblai et de remblai

5. Les tables des superficies de déblai et de remblai qui occupent ci-après les pages 1 à 20 s'appliquent à tous les gabarits de routes ou de chemins, croissant de mètre en mètre depuis 4 jusqu'à 12 mètres de largeur entre les arêtes extérieures des accotements. Elles ont été construites pour les gabarits représentés dans les figures 1 à 9 et définis par les conditions suivantes :

Le gabarit se compose de chaque côté de l'axe d'une droite horizontale passant par les arêtes extérieures des accotements, et d'un fossé avec talus de déblai, ou d'un talus de remblai ;

Les talus des fossés et des déblais sont inclinés à un de base pour un de hauteur ; ceux des remblais sont à trois de base pour deux de hauteur ;

Toutes les fois que le déblai à creuser pour la confection du fossé se réduirait à un triangle, le fossé est supprimé et remplacé par un talus de remblai ;

La largeur du fossé, mesurée *en gueule*, à la hauteur de l'horizontale passant par les arêtes extérieures des accotements, est triple de sa profondeur prise au-dessous de cette même horizontale, et triple aussi de sa largeur au fond.

Les tables des profils de 4, 5 et 6 mètres de largeur, qui s'appliquent particulièrement aux chemins vicinaux, ont été calculées pour des fossés d'un mètre seulement en gueule. Pour tous les autres profils on a supposé $1^m,50$ de largeur aux fossés.

6. Cela posé, on remarquera que lorsqu'il s'agit de chercher dans les tables une superficie de déblai ou de remblai pour un demi-profil en travers ; la cote sur l'axe peut être en déblai ou remblai, et que l'inclinaison du terrain naturel, dans ce demi-profil, peut aller soit en *montant* à partir de l'axe, auquel cas elle est dite en *rampe* ; soit en *descendant*, ou en *pente*.

Chacune des tables relatives à un profil de route est donc divisée en quatre parties, correspondant respectivement aux quatre cas suivants :

1° Terrain en *rampe*, cote en *déblai* sur l'axe ;

2° Terrain en *rampe*, cote en *remblai* sur l'axe ;

3° Terrain en *pente*, cote en *déblai* sur l'axe ;

4° Terrain en *pente*, cote en *remblai* sur l'axe.

De petites figures tracées en haut et à gauche de chacun des cadres correspondant à ces quatre cas, facilitent le choix que l'on doit faire, et préviennent les erreurs que l'on commettrait en cherchant dans une des quatre parties de la table autre que celle qui correspond à la cote et à l'inclinaison que l'on considère.

Enfin on trouve ces superficies de déblai et de remblai exprimées en mètres carrés et en centièmes de mètre carré, à la rencontre des colonnes verticales en haut desquelles sont placées les valeurs des inclinaisons du terrain naturel, avec les lignes horizontales qui commencent par les cotes de déblai et de remblai sur l'axe. On n'a d'ailleurs fait varier les valeurs des inclinaisons (1) que de 0,050 en 0,050 depuis 0,000 jusqu'à 0,250, et les valeurs des cotes que de $0^m,20$ en $0^m,20$ depuis $0^m,00$ jusqu'à 2 mètres. On a pensé que les tables ainsi construites suffiraient, dans un grand nombre de cas, sous le rapport des limites et de l'exactitude.

Soit proposé, pour exemple, de trouver les superficies qui correspondent à un demi-profil en travers en *pente* de 0,150, et à une cote de *remblai* de $1^m,60$ sur l'axe; le gabarit étant de 6 mètres de largeur entre les arêtes extérieures des accotements.

On cherchera la table correspondant à ce profil, qui occupe les pages 6 et 7; c'est évidemment le quatrième tableau, placé au bas de la page 7, qu'il faut considérer, comme le prouvent le titre de ce tableau et la figure placée à gauche de ce titre. Cette figure indique que la ligne horizontale ——— passant par les arêtes extérieures des accotements, est en remblai au-dessus de la ligne inclinée en pente soit à gauche , soit à droite de l'axe.

Dans la partie de la table ainsi choisie, on suivra la ligne horizontale qui commence par la cote de remblai $1^m,60$ jusqu'à la rencontre de la colonne verticale en tête de laquelle est placée l'inclinaison du terrain naturel 0,150; et on trouvera que la superficie de déblai correspondante est nulle, et que la superficie de remblai est égale à $9^m,55$ carrés.

On trouverait de la même manière que pour la cote en remblai de

(1) Les valeurs de ces inclinaisons sont exprimées par des nombres abstraits, tels que 0,017, 0,350, etc., qui indiquent le rapport de la hauteur verticale à la base horizontale du triangle rectangle dont l'hypoténuse est la droite même dont on exprime ainsi l'inclinaison.

$0^m,80$, et pour une inclinaison en rampe de 0,200 du terrain naturel, le gabarit restant le même, le profil en travers donnerait une superficie de $0^m,14$ carrés en déblai et de $1^m,51$ carrés en remblai.

Calcul des plans parcellaires

7. Le calcul des superficies des terrains à acquérir pour l'établissement d'une voie de communication nouvelle, n'a pas moins d'importance que le calcul des terrassements lui-même, si l'on compare les dépenses correspondant à ces deux éléments de l'avant-métré du projet. La mesure des parcelles prises à chacune des propriétés traversées dépendant essentiellement des largeurs totales occupées par la voie nouvelle (y compris les talus de déblai et de remblai), il est nécessaire de connaître ces largeurs en des points du profil en long suffisamment rapprochés. Or il faudrait, pour cela, avoir recours aux profils en travers dessinés à une échelle convenable, et renoncer ainsi à l'avantage que procurent les tables des superficies, si l'on n'avait pas des tables spéciales donnant immédiatement les largeurs totales prises par la nouvelle voie, à gauche ou à droite de l'axe.

Disposition et usage des tables des largeurs.

8. C'est dans ce but qu'ont été calculées les tables qui occupent ci-après les pages 21 à 30. La disposition de ces tables est la même que celle des tables de superficies de déblai et de remblai, quant à la division en quatre cas auxquels correspondent autant de tableaux; seulement on a pu placer sur une seule page les quatre tableaux correspondant à chaque gabarit de route, tandis que chaque gabarit des autres tables exige un verso et un recto.

Ainsi, pour le gabarit de 6 mètres, le terrain naturel étant en *pente* de 0,150 d'un côté de l'axe, et la cote étant de $1^m,60$ en *remblai* sur l'axe, la largeur occupée par le chemin du même côté de l'axe sera de $6^m,97$. On la trouve dans le quatrième tableau de la page 24, à la rencontre de la ligne horizontale commençant par $1^m,60$ avec la colonne verticale en tête de laquelle se trouve le nombre 0,150.

Pour le même gabarit, on trouve qu'à un terrain en rampe de 0,200 et à une cote en remblai de $0^m,80$ sur l'axe, correspond une largeur de 4 mètres.

Applications numériques des tables des superficies et des largeurs.

9. Pour familiariser le lecteur avec le maniement des tables de superficies de déblai et de remblai et des largeurs, nous donnons ci-dessous les résultats de quelques exemples numériques.

Toutes les fois que la cote sur l'axe et l'inclinaison du terrain naturel, quoique compris entre les limites des tables, ne se trouveront pas exactement dans ces tables; on prendra dans celles-ci les superficies et les largeurs qui correspondront à la cote et à l'inclinaison les plus rapprochées des données de la question.

| LARGEUR du profil en travers adopté. | INCLINAISON du terrain naturel en | | COTE sur l'axe en | | SUPERFICIES correspondantes de | | LARGEURS correspondantes prises par la route d'un côté de l'axe. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | rampe. | pente. | déblai. | remblai. | déblai. | remblai. | |
| m. | | | | m | m q | m q | m |
| 4,00 | 0,250 | » | » | 0,80 | 0,08 | 1,14 | 2,93 |
| | 0,050 | » | 2m,00 | » | 8,89 | » | 5,27 |
| | 0,000 | 0,000 | » | 0,20 | 0,06 | 0,42 | 2,80 |
| 7,00 | » | 0,150 | 0,40 | » | 0,74 | 0,06 | 4,70 |
| | » | 0,200 | 1,20 | » | 4,00 | » | 5,16 |
| | 0,250 | » | » | 1,20 | 0,33 | 2,72 | 5,06 |
| 10,00 | 0,050 | » | 1,80 | » | 15,63 | » | 8,75 |
| | 0,150 | » | » | 1,60 | » | 6,56 | 6,05 |
| | » | 0,200 | » | 2,00 | » | 22,12 | 11,43 |
| 12,00 | 0,050 | » | » | 0,60 | 0,18 | 2,72 | 7,27 |
| | 0,150 | » | » | 1,20 | 0,26 | 4,54 | 7,41 |
| | » | 0,050 | 0,20 | » | 0,70 | 0,12 | 7,33 |

Ainsi, le gabarit étant de 6 mètres, pour un terrain en rampe de 0,039 et pour une cote en remblai de $1^{m},78$, on prendra dans le second tableau de la page 6 la superficie de remblai $7^{m.q},06$, qui correspond à 0,050 de rampe et à $1^{m},80$ de remblai sur l'axe; et dans le second tableau de la page 24 la largeur $5^{m},30$ correspondant aux mêmes données.

Formules générales pour le calcul des superficies de déblai et de remblai et des largeurs.

10. Les tables des superficies et des largeurs comprises entre les pages 1 et 31, ne s'appliquent pas aux cas où les cotes de déblai ou de remblai sur l'axe excèdent 2 mètres, non plus qu'à ceux où l'inclinaison du terrain naturel en pente ou en rampe surpasse 0,250. Il est donc nécessaire de faire connaître ici les formules qui peuvent servir, soit au calcul de tables plus étendues, soit à l'évaluation directe des cas particuliers qui se trouveraient en dehors des limites de ces tables.

Ces formules sont renfermées dans le tableau ci-après. Elles ne s'appliquent qu'à un gabarit défini d'après les conditions du nº 5 (1).

On voit que chacun des quatre cas principaux dont il est question au nº 6 peut se subdiviser en trois au plus, de sorte qu'il y a en tout neuf systèmes de formules, parmi lesquels on doit choisir celui qui répond aux données de la question.

Le choix à faire est déterminé par les conditions d'inégalité qui occupent la troisième colonne à gauche du tableau.

(1) La démonstration de ces formules est donnée à la page XXXII.

## FORMULES GÉNÉRALES

*relatives au calcul des superficies de déblai et de remblai et des largeurs prises par une route de chaque côté de l'axe.*

- $l$ demi-largeur de la route entre les arêtes extérieures des accotements.
- $l'$ distance de l'axe de la route au bas du talus intérieur du fossé.
- $l''$ distance $l$ augmentée de la largeur en gueule du fossé.
- F aire du fossé au-dessous de l'horizontale qui termine le profil en travers à sa partie supérieure.
- $f$ largeur du fond du fossé.
- $h$ profondeur du fossé.
- $t$ inclinaison par mètre du talus de déblai.
- $t'$ inclinaison par mètre du talus de remblai.
- $d$ cote de déblai sur l'axe.
- $r$ cote de remblai sur l'axe.
- $p$ pente par mètre du terrain naturel à gauche ou à droite de l'axe, dans le profil en travers.
- $c$ rampe ou contrepente par mètre du terrain naturel à gauche ou à droite de l'axe, dans le profil en travers.
- D superficie de déblai dans le profil en travers.
- R superficie de remblai dans le profil en travers.
- L largeur prise par la route à gauche ou à droite de l'axe.

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Terrain en *rampe* et cote en *déblai*. | $c,d$ | | 1 | $R=0$ | $D=\frac{(l''t+d)^2}{2(t-c)}-\left(\frac{l''^2t}{2}-F\right)$ | $L=\frac{l''t+d}{t-c}$ |
| Terrain en *rampe* et cote en *remblai*. | $c,r$ | $r \leqq lc$ | 2 | $R=\frac{r^2}{2c}$ | $D=\frac{(l''t-r)^2}{2(t-c)}+R-\left(\frac{l''^2t}{2}-F\right)$ | $L=\frac{l''t-r}{t-c}$ |
| | | $r>lc$, $r<l'c+h$ | 3 | $R=\frac{(lt+r)^2}{2(t+c)}-\frac{l^2t}{2}$ | $D=\frac{(l''t-r)^2}{2(t-c)}+R-\left(\frac{l''^2t}{2}-F\right)$ | |
| | | $r \geqq l'c+h$ | 4 | $R=\frac{(lt'+r)^2}{2(t+c)}-\frac{l^2t'}{2}$ | $D=0$ | $L=\frac{lt'+r}{t'+c}$ |
| Terrain en *pente* et cote en *déblai*. | $p,d$ | $d \geqq lp$ | 5 | $R=0$ | $D=\frac{(l''t+d)^2}{2(t+p)}-\left(\frac{l''^2t}{2}-F\right)$ | $L=\frac{l''t+d}{t+p}$ |
| | | $d<lp$, $d+h>(l'+f)p$ | 6 | $R=\frac{(lt-d)^2}{2(t-p)}+\frac{d^2}{2p}-\frac{l^2t}{2}$ | $D=\frac{(l''t+d)^2}{2(t+p)}+R-\left(\frac{l''^2t}{2}-F\right)$ | |
| | | $d+h \leqq (l'+f)p$ | 7 | $R=\frac{(lt'-d)^2}{2(t'-p)}+\frac{d^2}{2p}-\frac{l^2t'}{2}$ | $D=\frac{d^2}{2p}$ | $L=\frac{lt'-d}{t'-p}$ |
| Terrain en *pente* et cote en *remblai*. | $p,r$ | $r+(l'+f)p<h$ | 8 | $R=\frac{(lt+r)^2}{2(t-p)}-\frac{l^2t}{2}$ | $D=\frac{(l''t-r)^2}{2(t+p)}+R-\left(\frac{l''^2t}{2}-F\right)$ | $L=\frac{l''t-r}{t+p}$ |
| | | $r+(l'+f)p \geqq h$ | 9 | $R=\frac{(lt'+r)^2}{2(t'-p)}-\frac{l^2t'}{2}$ | $D=0$ | $L=\frac{lt'+r}{t-p}$ |

Mais pour appliquer ces conditions d'inégalité aussi bien que les formules elles-mêmes, il faut commencer par substituer aux lettres qu'elles renferment les valeurs numériques de ces lettres pour le cas particulier que l'on considère.

11. C'est dans le but de faciliter cette substitution que l'on a réuni, dans la table suivante, les valeurs numériques des constantes qui entrent dans les formules. Cette table s'étend à des gabarits assez nombreux pour que l'on y trouve presque toutes les données nécessaires à la pratique.

TABLE DES VALEURS NUMÉRIQUES,

*des constantes qui entrent dans les formules pour différents profils de routes.*

| $l$ | $l'$ | $l''$ | $F$ | $f$ | $h$ | $t$ | $t'$ | $l'+f$ | $lt$ | $lt'$ | $l''t$ | $\frac{l''^2t}{2}-F$ | $\frac{l^2t}{2}$ | $\frac{l^2t'}{2}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| m | m | m | m q | m | m | | | m | m | m | m | m q | m q | m q |
| 1,50 | 1,67 | 2,00 | 0,056 | 0,17 | 0,17 | 1 | 2/3 | 1,83 | 1,50 | 1,00 | 2,00 | 1,944 | 1,125 | 0,750 |
| 1,50 | 1,78 | 2,33 | 0,153 | 0,28 | 0,28 | 1 | 2/3 | 2,05 | 1,50 | 1,00 | 2,33 | 2,568 | 1,125 | 0,750 |
| 1,50 | 1,83 | 2,50 | 0,222 | 0,33 | 0,33 | 1 | 2/3 | 2,17 | 1,50 | 1,00 | 2,50 | 2,903 | 1,125 | 0,750 |
| 2,00 | 2,33 | 3,00 | 0,222 | 0,33 | 0,33 | 1 | 2/3 | 2,67 | 2,00 | 1,33 | 3,00 | 4,278 | 2,000 | 1,333 |
| 2,00 | 2,50 | 3,50 | 0,500 | 0,50 | 0,50 | 1 | 2/3 | 3,00 | 2,00 | 1,33 | 3,50 | 5,625 | 2,000 | 1,333 |
| 2,50 | 3,00 | 4,00 | 0,500 | 0,50 | 0,50 | 1 | 2/3 | 3,50 | 2,50 | 1,67 | 4,00 | 7,500 | 3,125 | 2,083 |
| 3,00 | 3,50 | 4,50 | 0,500 | 0,50 | 0,50 | 1 | 2/3 | 4,00 | 3,00 | 2,00 | 4,50 | 9,625 | 4,500 | 3,000 |
| 3,50 | 4,00 | 5,00 | 0,500 | 0,50 | 0,50 | 1 | 2/3 | 4,50 | 3,50 | 2,33 | 5,00 | 12,000 | 6,125 | 4,083 |
| 4,00 | 4,50 | 5,50 | 0,500 | 0,50 | 0,50 | 1 | 2/3 | 5,00 | 4,00 | 2,67 | 5,50 | 14,625 | 8,000 | 5,333 |
| 4,50 | 5,00 | 6,00 | 0,500 | 0,50 | 0,50 | 1 | 2/3 | 5,50 | 4,50 | 3,00 | 6,00 | 17,500 | 10,125 | 6,750 |
| 5,00 | 5,50 | 6,50 | 0,500 | 0,50 | 0,50 | 1 | 2/3 | 6,00 | 5,00 | 3,33 | 6,50 | 20,625 | 12,500 | 8,333 |
| 5,50 | 6,00 | 7,00 | 0,500 | 0,50 | 0,50 | 1 | 2/3 | 6,50 | 5,50 | 3,67 | 7,00 | 24,000 | 15,125 | 10,083 |
| 6,00 | 6,50 | 7,50 | 0,500 | 0,50 | 0,50 | 1 | 2/3 | 7,00 | 6,00 | 4,00 | 7,50 | 27,625 | 18,000 | 12,000 |
| 6,00 | 6,67 | 8,00 | 0,889 | 0,67 | 0,67 | 1 | 2/3 | 7,33 | 6,00 | 4,00 | 8,00 | 31,111 | 18,000 | 12,000 |
| 6,50 | 7,17 | 8,50 | 0,889 | 0,67 | 0,67 | 1 | 2/3 | 7,83 | 6,50 | 4,33 | 8,50 | 35,236 | 21,125 | 14,083 |
| 7,00 | 7,67 | 9,00 | 0,889 | 0,67 | 0,67 | 1 | 2/3 | 8,33 | 7,00 | 4,67 | 9,00 | 39,611 | 24,500 | 16,333 |
| 7,50 | 8,17 | 9,50 | 0,889 | 0,67 | 0,67 | 1 | 2/3 | 8,83 | 7,50 | 5,00 | 9,50 | 44,236 | 28,125 | 18,750 |
| 8,00 | 8,67 | 10,00 | 0,889 | 0,67 | 0,67 | 1 | 2/3 | 9,33 | 8,00 | 5,33 | 10,00 | 49,611 | 32,000 | 21,333 |

12. S'agit-il, par exemple, de déterminer le système de formules applicable à un projet de route de 10 mètres de largeur entre les arêtes extérieures des accotements, avec fossés de $1^{m},50$ de largeur en gueule, et de

Application des formules générales.

$0^m,50$ de profondeur, les talus de déblai et de remblai ayant leurs inclinaisons respectives ordinaires, savoir 1 de base sur 1 de hauteur, et 3 de base sur 2 de hauteur?

On trouvera dans la table susdite les valeurs suivantes, qui occupent la ligne horizontale commençant par le nombre 5,00 :

| | | |
|---|---|---|
| $l=5^m,00$ | $h=0^m,50$ | $lt'=3^m,333.$ |
| $l'=5^m,50$ | $t=1,$ | $l't=6^m,50.$ |
| $l''=6^m,50$ | $t'=\frac{2}{3}.$ | $\frac{l''^2t}{2}-F=20^{mq},625.$ |
| $F=0^{mq},500$ | $l'+f=6^m,00$ | $\frac{l^2t}{2}=12^{mq},500.$ |
| $f=0,^m50$ | $lt=5^m,00$ | $\frac{l^2t'}{2}=8^{mq},333$ |

et il en résultera le tableau suivant pour les formules relatives au profil ci-dessus défini.

*Tableau des formules relatives au profil de 10 mètres de largeur.*

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Terrain en rampe et cote en déblai. | $c,d$ | | 1 | $R=0$ | $D=\frac{(6,50+d)^2}{2(1-c)}-20,625$ | $L=\frac{6,50+d}{1-c}$ |
| Terrain en rampe et cote en remblai. | $c,r$ | $r\leqq 5c$ | 2 | $R=\frac{r^2}{2c}$ | $D=\frac{(6,50-r)^2}{2(1-c)}+R-20,625$ | $L=\frac{6,50-r}{1-c}$ |
| | | $r>5c$ <br> $r<5,50c+0,50$ | 3 | $R=\frac{(5,00+r)^2}{2(1+c)}-12,500$ | $D=\frac{(6,50-r)^2}{2(1-c)}+R-20,625$ | |
| | | $r\geqq 5,50c+0,50$ | 4 | $R=\frac{(3,33+r)^2}{2(\frac{2}{3}+c)}-8,333$ | $D=0$ | $L=\frac{3,33+r}{\frac{2}{3}+c}$ |
| Terrain en pente et cote en déblai. | $p,d$ | $d\geqq 5p$ | 5 | $R=0$ | $D=\frac{(6,50+d)^2}{2(1+p)}-20,625$ | $L=\frac{6,50+d}{1+p}$ |
| | | $d<5p$ <br> $d+0,50>6p$ | 6 | $R=\frac{(5,00-d)^2}{2(1-p)}+\frac{d^2}{2p}-12,500$ | $D=\frac{(6,50+d)^2}{2(1+p)}+R-20,625$ | |
| | | $d+0,50\leqq 6p$ | 7 | $R=\frac{(3,33-d)^2}{2(\frac{2}{3}-p)}+\frac{d^2}{2p}-8,333$ | $D=\frac{d^2}{2p}$ | $L=\frac{3,33-d}{\frac{2}{3}-p}$ |
| Terrain en pente et cote en remblai. | $p,r$ | $r+6p<0,50$ | 8 | $R=\frac{(5,00+r)^2}{2(1-p)}-12,500$ | $D=\frac{(6,50-r)^2}{2(1+p)}+R-20,625$ | $L=\frac{6,50-r}{1+p}$ |
| | | $r+6p\geqq 0,50$ | 9 | $R=\frac{(3,33+r)^2}{2(\frac{2}{3}-p)}-8,333$ | $D=0$ | $L=\frac{3,33+r}{\frac{2}{3}-p}$ |

Le calcul des superficies de déblai et de remblai et des largeurs correspondant à un certain profil en travers, ne dépend plus alors que de la cote de déblai $d$ ou de remblai $r$ sur l'axe du projet, et que de l'inclinaison en pente $p$ ou en contre-pente $c$ du terrain naturel de chaque côté de l'axe.

Ainsi, en prenant pour les données de la question une cote nulle sur l'axe et une inclinaison du terrain naturel de 0,039 en pente, on entrera avec les éléments ou *arguments* $p = 0{,}039$ et $r = 0$ dans la seconde colonne du tableau; et comme on a $0{,}039 \times 6$ ou 0,234 moindre que 0,50, l'inégalité $r + 6p < 0{,}50$ est satisfaite; c'est le système de formules désigné par le chiffre 8 dans le tableau, qu'il faut appliquer ici. On aura donc, en substituant dans ces formules les valeurs de $p$ et de $r$,

Pour le remblai. . . $$R = \frac{(5{,}00)^2}{2(1 - 0{,}039)} - 12^{m.q.}{,}500,$$

Pour le déblai. . . . $$D = \frac{\overline{6{,}50}^2}{2(1 + 0{,}039)} + R - 20^{m.q.}{,}625,$$

Pour la largeur. . . $$L = \frac{6{,}50}{1 + 0{,}039},$$

expressions qui ne renferment plus que des nombres, et dont les résultats, faciles à calculer, seront des mètres carrés pour R et pour D, et des mètres linéaires pour L.

*Disposition et usage des tables auxiliaires pour abréger le calcul de ces formules.*

13. Mais les tables auxiliaires qui occupent les pages 33 à 52, fournissent le moyen d'obtenir ces résultats numériques bien plus promptement que par les procédés de calcul ordinaires. Il suffit d'avoir sous les yeux le tableau des formules concernant le gabarit adopté, et d'avoir choisi, dans ce tableau, le système des formules correspondant au cas que l'on considère.

Pour obtenir d'abord dans la *table des numérateurs*, qui occupe les pages 33 à 47, les valeurs correspondant à ces numérateurs $(5^m{,}00 + r)^2$, $(6^m{,}50 - r)^2$, $6^m{,}50 - r$, on cherchera dans une des colonnes verticales commençant par 5,00 et par 6,50, jusqu'à ce qu'on y trouve le nombre $r$. Dans le cas de $r = 0{,}00$, cela a lieu à la dernière ligne de la page 37 pour $5^m{,}00 + r$, et à la trentième ligne de la page 39 pour $6^m{,}50 - r$. On suit alors la ligne horizontale sur laquelle est placée cette valeur de $r$, en allant de droite à gauche, jusqu'à la rencontre de la colonne ver-

ticale, en tête de laquelle est la désignation Log $y^2$ ; et on y prend dans cette colonne le nombre que l'on y trouve, savoir :

Pour $(5^m,00+r)^2$. . . . . . . 1,3979400
Pour $(6^m,50-r)^2$. . . . . . . 1,6258267

Quant au nombre qui convient à $6^m,50-r$, il se trouvera dans la colonne intitulée Log $2y$ ; ce sera

Pour $6^m,50-r$. . . . . . . . 1,1139434

La *table des dénominateurs* comprise entre les pages 48 et 53, fournira de même les valeurs correspondant aux dénominateurs $2(1^m-0,039)$, $2(1^m+0,039)$. En cherchant dans la première colonne à gauche, intitulée $x$, on ne trouve pas, il est vrai, le nombre 0,039, mais on prend 0,040 qui en approche le plus, à la huitième ligne de la page 48 ; et on suit alors la ligne horizontale commençant par 0,040, jusqu'à la rencontre de la colonne verticale en tête de laquelle sont les indications

$$\text{Log.}2(1-x)^2 \quad \text{et} \quad \text{Log.}2(1+x) :$$

on trouve ainsi les nombres

0,2833012 et 0,3180633.

Ces nombres obtenus, on retranche celui qui correspond à chaque dénominateur, du nombre que l'on a trouvé pour le numérateur de la fraction, et l'on a

| | | | |
|---|---|---|---|
| +. . . . | 1,3979400, | 1,6258267, | 1,1139434 |
| −. . . . | 0,2833012, | 0,3180633, | 0,3180633 |
| Restes. . | 1,1146388, | 1,3077634, | 0,7958801 |

On revient alors à la table des numérateurs, et on cherche dans la colonne intitulée Log $y$ ou dans la colonne intitulée Log $2y$, les nombres les plus rapprochés de ces restes, pour prendre : les nombres placés à côté dans la colonne $y$, dans le premier cas; et les doubles de ces nombres, dans le second.

Or, 1,1146388 est compris entre 1,1139434 et 1,1156105 placés à la

page 44, dans la colonne Log $y$; on prendra donc 13,00 qui est à côté de 1,1139434 dans cette colonne.

1,3077634 est en dehors des limites de la colonne Log $y$; mais on trouve que le nombre qui s'en rapproche le plus est 1,3074960 qui occupe la seconde ligne de la colonne Log $2y$, à la page 42. On prendra donc 20,30, double de 10,15 placé dans la colonne $y$, sur la même ligne.

Enfin 0,7958800, qui est presque identique au reste 0,7958801, est le nombre de la colonne Log $y$, auquel correspond 6,25 dans la colonne $y$.

Cela posé $13^{m.q},00$ est précisément la valeur approchée de l'expression $\frac{(5,00)^2}{2(1-0,039)}$, et il suffit d'en retrancher la constante $12^{m.q},50$ pour avoir la valeur $0^{m.q},50$ de la superficie de remblai R; $20^{m.q},30$ est la valeur approchée de $\frac{\overline{6,50}^2}{2(1+0,039)}$, en ajoutant $0^{m.q},50$ ou R à 20,30 on a $20^{m.q},80$, d'où retranchant $20^{m.q},62$ reste $0^{m.q},18$ pour la valeur de D.

Enfin $6^m,25$ est la largeur prise par la route du côté de l'axe où se trouve le demi-profil en travers que nous avons considéré.

Cet exemple a été choisi, à dessein, parmi les plus compliqués que l'on puisse rencontrer dans la pratique. Il suffit pour faire ressortir tout l'avantage que présente l'emploi des tables auxiliaires, lorsqu'il s'agit d'obtenir les résultats numériques des formules.

14. On remarquera que dans les diverses colonnes de la table des numérateurs à partir de la quatrième, il y a toujours à la partie supérieure et à la partie inférieure un signe + ou un signe — qui se rapporte à tous les nombres placés au-dessous ou au-dessus; un gros trait sépare les nombres affectés du signe + de ceux qui sont affectés du signe — dans une même colonne. Il sera donc facile d'éviter toute méprise, et de ne pas confondre, dans l'usage de cette table, les nombres tels que $6^m,50 + d$ avec $6^m,50 - d$.

15. Les colonnes intitulées Log $y$, Log $2y$ et Log $y^2$, à la table des numérateurs; Log $2x$, Log $2(\frac{b}{2} - x)$, Log $2(\frac{b}{2} - x)$, à la table des dénominateurs, renferment des nombres dont la partie entière est affectée du signe — placé au-dessus. Ce signe indique que cette partie entière seule doit être retranchée, lorsque le nombre dont elle fait partie est combiné avec d'autres par voie d'addition, et qu'il faut l'ajouter au contraire, quand le nombre doit être soustrait. Si le résultat final obtenu d'après cette règle, ren-

ferme une partie entière affectée du signe + ou du signe —, on cherchera, dans la colonne $y$, le nombre qui correspond seulement à la quantité décimale prise dans la colonne Log $y$ ou Log $2y$, ainsi qu'on l'a expliqué au n° 13, et on reculera la virgule décimale de ce nombre d'autant de rangs vers la droite ou vers la gauche, que la partie entière affectée du signe + ou du signe — renferme d'unités de plus que cette quantité décimale.

Prenons pour exemple le calcul des expressions

$$\frac{(1,33 - 0,88)^2}{2\left(\frac{2}{3} - 0,225\right)}, \quad \frac{(8,50 + 7,15)^2}{2(1 - 0,265)}.$$

Les nombres correspondant aux numérateurs sont

$\bar{1},3064250$ et $2,3608252$;

les nombres correspondant aux dénominateurs sont

$\bar{1},9461230$ et $0,1673173$.

En retranchant respectivement les nombres inférieurs des supérieurs on trouve les restes

$\bar{1},3603020$ et $2,1935079$.

Les nombres les plus approchés sont

0,3617278 et 1,1931246,

qui, dans la colonne Log $y$, correspondent respectivement à

2,30 et à 15,60.

Les valeurs cherchées, en avançant la virgule d'un rang à gauche pour la première et d'un rang à droite pour la seconde, sont donc

0,230 et 156,0.

Résumé pratique. 16. Lorsque l'on voudra employer les tables auxiliaires de numérateurs et de dénominateurs au calcul des superficies de remblai et de déblai, d'un gabarit déterminé, on commencera par dresser pour ce gabarit un tableau des neuf formules qui y sont applicables, en substituant dans les formules générales du n° 10 les valeurs numériques des

constantes relatives à ce gabarit. On trouvera ordinairement ces valeurs dans la table du n° 12, si ce n'est lorsque les inclinaisons des talus de déblai et de remblai seront différentes de 1 et de $\frac{2}{3}$; dans tous les cas ces valeurs seront faciles à calculer.

Ayant sous les yeux le tableau des neuf systèmes de formules relatifs au gabarit que l'on considère, on cherchera pour chaque demi-profil en travers déterminé, quel est le système applicable, d'après la relation d'inégalité qui existe entre l'inclinaison du terrain naturel, et la cote en déblai ou en remblai sur l'axe; enfin on calculera au moyen des tables auxiliaires de numérateurs et de dénominateurs les valeurs numériques données par chaque formule.

17. Pour éclaircir complétement ce sujet, il a paru utile de donner ici une application complète et détaillée des principes précédents au calcul des superficies de déblai et de remblai d'un projet de route. La planche II représente le profil en long sur 611 mètres de longueur, et les 17 premiers profils en travers d'une route à ouvrir sur un coteau escarpé. Les parties hachées sont en déblai, et les parties pointillées en remblai. Les différents éléments du profil en long sont cotés suivant les notations ordinaires. Les profils en travers pour lesquels le terrain naturel est constamment régulier des deux côtés de l'axe, sont complétement définis par les cotes de déblai ou de remblai sur l'axe, par le gabarit adopté pour la route, et par les valeurs attribuées à l'inclinaison du terrain naturel de chaque côté de l'axe: *p* indiquant une pente, et *c* une contre-pente ou rampe, exprimées en millimètres par mètre, ou en millièmes de la base. Ainsi, par exemple, au-dessous du profil 12, on voit que le côté gauche descend suivant une pente 0,190, et que le côté droit monte suivant une rampe de 0,320. La cote sur l'axe étant de $0^m,52$ en déblai, le profil en travers sera défini, suivant les notations adoptées par les quantités $p=0,190$, $c=0,320$, $d=0^m,52$; et par le gabarit adopté, aussi bien que par le dessin qui le représente. Pour le gabarit on a pris celui de 10 mètres, auquel sont applicables les formules du n° 12. Application détaillée des tables de numérateurs et de dénominateurs.

Les calculs suivants sont disposés de manière à pouvoir être facilement suivis, surtout si l'on se reporte aux explications et aux exemples des n$^{os}$ 13, 14 et 15. Il y a lieu de faire observer qu'en employant exclusivement les tables de numérateurs et de dénominateurs, on n'opère qu'avec une approximation qui ne s'étend pas toujours jusqu'au chiffre des dixièmes, et qui affecte souvent ce chiffre. C'est ainsi que dans le calcul

du profil 1, on trouve $D = 0^{m.q},475$ au lieu de la valeur exacte $D = 0^{m.q},500$. Il n'en résultera aucun inconvénient aux yeux des personnes qui savent apprécier les limites de l'exactitude désirable dans un projet de route.

D'ailleurs on pourra obtenir souvent une plus grande approximation en prenant dans la colonne $y$ ou dans la colonne $2y$ de la table des numérateurs, un nombre intermédiaire convenable entre les valeurs de ceux que l'on peut choisir dans la table. Ainsi, dans le calcul de la superficie de déblai du côté gauche du profil 6, si l'on cherche à quel nombre correspond dans la colonne $y$ le nombre 0,7346414, on trouve que celui-ci est compris entre 0,7323938 et 0,7363965, dans la colonne Log $y$, et qu'il en est à peu près également distant; le nombre donné étant 1,7346414, on prendra, pour la valeur de $y$, 54,25 moyenne arithmétique, à la virgule près, entre 5,40 et 5,45 qui correspondent respectivement, dans la colonne $y$, à 0,7323988 et à 0,7363965.

CÔTÉ GAUCHE. CÔTÉ DROIT.

PROFIL 1.

**Côté gauche.** Formules 1.

$d = 0$, $e = 0,00$
$R = 0$
$\text{Log } (6^m,50 + 0)^2 = 1,6258267$
$\text{Log } 2(1 - 0) = 0,3010300$
$1,3247967 = \text{Log } 21^{m.q},100$
$20,625$
$0^{m.q},475 = D$

$\text{Log } 2 \times 6,50 = 1,1139434$
$\text{Log } 2(1 - 0) = 0,3010300$
$0,8129134 = \text{Log } 6^m,50 = L$

**Côté droit.** Formules 1.

$d = 0$, $e = 0,00$
$R = 0$
$0^{m.q},475 = D$
$6^m,50 = L$

PROFIL 2.

**Côté gauche.** Formules 5.

$d = 0^m,45$, $p = 0,021$, $d > 5p$
$R = 0$
$\text{Log } (6,50 + 0,45)^2 = 1,6839696$
$\text{Log } 2(1 + 0,020) = 0,3096302$
$1,3743394 = \text{Log } 23^{m.q},700$
$20,625$
$3^{m.q},075 = D$

$\text{Log } 2(6,50 + 0,45) = 1,1431848$
$\text{Log } 2(1 + 0,020) = 0,3096302$
$0,8335546 = \text{Log } 6^m,80 = L$

**Côté droit.** Formules 5.

$d = 0^m,45$, $p = 0,033$, $d > 5p$
$R = 0$
$\text{Log } (6,50 + 0,45)^2 = 1,6839696$
$\text{Log } 2(1 + 0,035) = 0,3159703$
$1,3679993 = \text{Log } 23^{m.q},300$
$20,625$
$2^{m.q},675 = D$

$\text{Log } 2(6,50 + 0,45) = 1,1431848$
$\text{Log } 2(1 + 0,035) = 0,3159703$
$0,8272145 = \text{Log } 6^m,70 = L$

## PROFIL 3.

**Côté gauche.**

$d = \overset{m}{0,30}$, $p = 0,013$ $d > 5p$ — Formules 5.

R = 0

Log $(6,50 + 0,30)^2$ = 1,6650178
Log 2 (1 + 0,015) = 0,3074960
1,3575218 = Log $\overset{m.q}{22,800}$
20,625
2,175 = D

Log 2 (6,50 + 0,30) = 1,1335389
Log 2 (1 + 0,015) = 0,3074960
0,8260429 = Log $\overset{m}{6,700}$ = L

**Côté droit.**

$d = \overset{m}{0,30}$, $c = 0,022$ — Formules 1.

R = 0

Log $(6,50 + 0,30)^2$ = 1,6650178
Log 2 (1 − 0,020) = 0,2922561
1,3727617 = Log $\overset{m.q}{23,600}$
20,625
2,975 = D

Log 2 (6,50 + 0,30) = 1,1335389
Log 2 (1 − 0,020) = 0,2922561
0,8412828 = Log $\overset{m}{6,95}$ = L

## PROFIL 4.

**Côté gauche.**

$r = 0$, $p = 0,039$ $r + 6p < 0,50$ — Formules 8.

Log $(5,00 + 0)^2$ = 1,3979400
Log 2 (1 − 0,040) = 0,2833012
1,1146388 = Log $\overset{m.q}{13,000}$
12,500
0,500 = R

Log $(6,50 - 0)^2$ = 1,6258267
Log 2 (1 + 0,040) = 0,3180633
1,3077634 = Log 20,300
0,500
20,800
20,625
0,175 = D

Log 2 (6,50 − 0) = 1,1139434
Log 2 (1 + 0,040) = 0,3180633
0,7958801 = Log 6,25 = L

**Côté droit.**

$r = 0$, $c = 0,060$ — Formules 1.

R = 0

Log $(6,50 + 0)^2$ = 1,6258267
Log 2 (1 − 0,060) = 0,2741578
1,3516689 = Log $\overset{m.q}{22,500}$
20,625
1,875 = D

Log 2 (6,50 + 0) = 1,1139434
Log 2 (1 − 0,060) = 0,2741578
0,8397856 = Log $\overset{m}{6,90}$ = L

## PROFIL 5.

**Côté gauche.**

$d = \overset{m}{2,07}$, $c = 0$ — Formules 1.

R = 0

Log $(6,50 + 2,05)^2$ = 1,8639322
Log 2 (1 − 0) = 0,3010300
1,5629022 = Log $\overset{m.q}{36,500}$
20,625
15,875 = D

Log 2 (6,50 + 2,05) = 1,2329961
Log 2 (1 − 0) = 0,3010300
0,9319661 = Log $\overset{m}{8,550}$ = L

**Côté droit.**

$d = \overset{m}{2,07}$, $p = 0,039$ $d > 5p$ — Formules 5.

R = 0

Log $(6,50 + 2,05)^2$ = 1,8639322
Log 2 (1 + 0,040) = 0,3180633
1,5458689 = Log $\overset{m.q}{35,300}$
20,625
14,675 = D

Log 2 (6,50 + 2,05) = 1,2329961
Log 2 (1 + 0,040) = 0,3180633
0,9149328 = Log $\overset{m}{8,20}$ = L

## PROFIL 6.

**CÔTÉ GAUCHE.**

$d = 4^{m},12, \quad p = 0,035 \quad d > 5p$ — Formule 5.

$R = 0$

$\text{Log } (6,50 + 4,10)^2 = 2,0506117$

$\text{Log } 2(1 + 0,055) = 0,5159703$

$1,7346414 = \text{Log } 54^{m.q},250$

$20,625$

$53,625 = D$

$\text{Log } 2(6,50 + 4,10) = 1,3265359$

$\text{Log } 2(1 + 0,055) = 0,5159703$

$1,0103656 = \text{Log } 10^{m},25 = L$

**CÔTÉ DROIT.**

$d = 4^{m},12, \quad c = 0,022$ — Formule 1.

$R = 0$

$\text{Log } (6,50 + 4,10)^2 = 2,0506117$

$\text{Log } 2(1 - 0,020) = 0,2922561$

$1,7583556 = \text{Log } 57^{m.q},300$

$20,625$

$36,675 = D$

$\text{Log } 2(6,50 + 4,10) = 1,5263359$

$\text{Log } 2(1 - 0,020) = 0,2922561$

$1,0340798 = \text{Log } 10^{m},80 = L$

## PROFIL 7.

**CÔTÉ GAUCHE.**

$d = 5^{m},05, \quad p = 0,008 \quad d > 5p$ — Formule 5.

$R = 0$

$\text{Log } (6,50 + 5,05)^2 = 2,1251640$

$\text{Log } 2(1 + 0,010) = 0,3053514$

$1,8198126 = \text{Log } 66^{m.q},000$

$20,625$

$45,375 = D$

$\text{Log } 2(6,50 + 5,05) = 1,3636120$

$\text{Log } 2(1 + 0,010) = 0,3053514$

$1,0582606 = \text{Log } 11^{m},45 = L$

**CÔTÉ DROIT.**

$d = 5^{m},03, \quad c = 0,042$ — Formule 1.

$R = 0$

$\text{Log } (6,50 + 5,05)^2 = 2,1251640$

$\text{Log } 2(1 - 0,040) = 0,2833012$

$1,8418628 = \text{Log } 69^{m.q},500$

$20,625$

$48,875 = D$

$\text{Log } 2(6,50 + 5,05) = 1,3636120$

$\text{Log } 2(1 - 0,040) = 0,2833012$

$1,0803108 = \text{Log } 12^{m},05 = L$

## PROFIL 8.

**CÔTÉ GAUCHE.**

$d = 6^{m},06, \quad p = 0,039 \quad d > 5p$ — Formule 5.

$R = 0$

$\text{Log } (6,50 + 6,05)^2 = 2,1972874$

$\text{Log } 2(1 + 0,040) = 0,3180633$

$1,8792241 = \text{Log } 75^{m.q},750$

$20,625$

$55,125 = D$

$\text{Log } 2(6,50 + 6,05) = 1,3996757$

$\text{Log } 2(1 + 0,040) = 0,3180635$

$1,0816104 = \text{Log } 12^{m},05 = L$

**CÔTÉ DROIT.**

$d = 6^{m},06, \quad c = 0,023$ — Formule 1.

$R = 0$

$\text{Log } (6,50 + 6,05)^2 = 2,1972874$

$\text{Log } 2(1 - 0,025) = 0,2900346$

$1,9072528 = \text{Log } 80^{m.q},800$

$20,625$

$60,175 = D$

$\text{Log } 2(6,50 + 6,05) = 1,3996737$

$\text{Log } 2(1 - 0,025) = 0,2900346$

$1,1096391 = \text{Log } 12^{m},90 = L$

## PROFIL 9.

**CÔTÉ GAUCHE.**

$d = 5^{m},34, \quad p = 0,026 \quad d > 5p$ — Formule 5.

$R = 0$

**CÔTÉ DROIT.**

$d = 5^{m},34, \quad c = 0,029$ — Formule 1.

$R = 0$

## CÔTÉ GAUCHE.

$\mathrm{Log}\,(6{,}50+5{,}35)^2 = 2{,}1474367$
$\mathrm{Log}\,2\,(1+0{,}025) = 0{,}3117539$
$1{,}8356828 = \mathrm{Log}\ \overset{m.q}{68{,}500}$
$20{,}625$
$47{,}875 = D$

$\mathrm{Log}\,2\,(6{,}50+5{,}35) = 1{,}3747483$
$\mathrm{Log}\,2\,(1+0{,}025) = 0{,}3117539$
$1{,}0629944 = \mathrm{Log}\ \overset{m}{11{,}55} = L$

## CÔTÉ DROIT.

$\mathrm{Log}\,(6{,}50+5{,}35)^2 = 2{,}1474367$
$\mathrm{Log}\,2\,(1-0{,}030) = 0{,}2878017$
$1{,}8596350 = \mathrm{Log}\ \overset{m.q}{72{,}250}$
$20{,}625$
$51{,}625 = D$

$\mathrm{Log}\,2\,(6{,}50+5{,}35) = 1{,}3747483$
$\mathrm{Log}\,2\,(1-0{,}030) = 0{,}2878017$
$1{,}0869466 = \mathrm{Log}\ \overset{m}{12{,}20} = L$

## PROFIL 10.

$d = \overset{m}{3{,}28},\quad p = 0{,}016 \quad d > 5p$ Formule 5.
$R = 0$
$\mathrm{Log}\,(6{,}50+3{,}30)^2 = 1{,}9824522$
$\mathrm{Log}\,2\,(1+0{,}015) = 0{,}3074960$
$1{,}6749562 = \mathrm{Log}\ \overset{m.q}{47{,}250}$
$20{,}625$
$26{,}625 = D$

$\mathrm{Log}\,2\,(6{,}50+3{,}30) = 1{,}2922561$
$\mathrm{Log}\,2\,(1+0{,}015) = 0{,}3074960$
$0{,}9847601 = \mathrm{Log}\ \overset{m}{9{,}65} = L$

$d = \overset{m}{3{,}28},\quad c = 0{,}050$ Formule 1.
$R = 0$
$\mathrm{Log}\ (6{,}50+3{,}30)^2 = 1{,}9824522$
$\mathrm{Log}\,2\,(1-0{,}050) = 0{,}2787536$
$1{,}7036986 = \mathrm{Log}\ \overset{m.q}{50{,}500}$
$20{,}625$
$29{,}875 = D$

$\mathrm{Log}\,2\,(6{,}50+3{,}30) = 1{,}2922561$
$\mathrm{Log}\,2\,(1-0{,}050) = 0{,}2787536$
$1{,}0135025 = \mathrm{Log}\ \overset{m}{10{,}35} = L$

## PROFIL 11.

$r = 0,\quad p = 0{,}230 \quad r + 6p > 0{,}50$ Formule 9.
$\mathrm{Log}\,(3{,}33+0{,}02)^2 = 1{,}0500896$
$\mathrm{Log}\,2\,(\tfrac{2}{3}-0{,}230) = \bar{1}{,}9411784$
$1{,}1089112 = \mathrm{Log}\ \overset{m.q}{12{,}850}$
$8{,}333$
$4{,}517 = R$

$D = 0$
$\mathrm{Log}\,2\,(3{,}33+0{,}02) = 0{,}8260748$
$\mathrm{Log}\,2\,(\tfrac{2}{3}-0{,}230) = \bar{1}{,}9411784$
$0{,}8848964 = \mathrm{Log}\ 7{,}675 = L$

$r = 0,\quad c = 0{,}160$ Formule 1.
$R = 0$
$\mathrm{Log}\,(6{,}50+0)^2 = 1{,}6258267$
$\mathrm{Log}\,2\,(1-0{,}160) = 0{,}2253093$
$1{,}4005174 = \mathrm{Log}\ \overset{m.q}{25{,}100}$
$20{,}625$
$4{,}475$

$\mathrm{Log}\,2\,(6{,}50+0) = 1{,}1139434$
$\mathrm{Log}\,2\,(1-0{,}160) = 0{,}2253093$
$0{,}8886341 = \mathrm{Log}\ \overset{m}{7{,}750} = L$

## PROFIL 12.

$d = \overset{m}{0{,}520},\quad p = 0{,}190 \quad d + 0{,}50 < 6p$ Formule 7.
$\mathrm{Log}\,0{,}52^2 = \bar{1}{,}4320067$
$\mathrm{Log}\,2 \times 0{,}190 = \bar{1}{,}5797836$
$\bar{1}{,}8522231 = \mathrm{Log}\ \overset{m.q}{0{,}710} = D$

$d = \overset{m}{0{,}520},\quad c = 0{,}320$ Formule 1.
$R = 0$

## CÔTÉ GAUCHE.

$\text{Log}\ (3,33-0,53)^2=0,8943161$
$\text{Log}\ 2\left(\frac{2}{3}-0,190\right)=\bar{1},9792433$
$0,9150728=\text{Log}\ \overset{m.q}{8,225}$
$0,710$
$8,935$
$8,333$
$0,602=R$

$\text{Log}\ 2(3,33-0,53)=0,7481880$
$\text{Log}\ 2\left(\frac{2}{3}-0,190\right)=\bar{1},9792433$
$0,7689447=\text{Log}\ \overset{m}{5,875}=L$

## CÔTÉ DROIT.

$\text{Log}\ (6,50+0,50)^2=1,6901961$
$\text{Log}\ 2(1-0,320)=0,1335389$
$1,5566572=\text{Log}\ \overset{m.q}{36,000}$
$20,625$
$15,375=D$

$\text{Log}\ 2(6,50+0,50)=1,1461280$
$\text{Log}\ 2(1-0,320)=0,1335389$
$1,0125891=\text{Log}\ \overset{m}{10,300}=L$

## PROFIL 13.

$r=\overset{m}{2,43},\quad p=0,350\quad r+6p>0,50$ Formule 9
$\text{Log}\ (3,33+2,42)^2=1,5193357$
$\text{Log}\ 2\left(\frac{2}{3}-0,350\right)=\bar{1},8016301$
$1,7177056=\text{Log}\ \overset{m.q}{52,250}$
$8,333$
$43,917=R$
$D=0$
$\text{Log}\ 2(3,33+2,42)=1,0606978$
$\text{Log}\ 2\left(\frac{2}{3}-0,350\right)=\bar{1},8016301$
$1,2590677=\text{Log}\ \overset{m}{18,150}=L$

$r=\overset{m}{2,43},\quad e=0,270\quad r>5,50e+0,50$ Formule 4.
$\text{Log}\ (3,33+2,42)^2=1,5193357$
$\text{Log}\ 2\left(\frac{2}{3}+0,270\right)=0,2726073$
$1,2467284=\text{Log}\ \overset{m.q}{17,650}$
$8,333$
$9,317=R$
$D=0$
$\text{Log}\ 2(3,33+2,42)=1,0606978$
$\text{Log}\ 2\left(\frac{2}{3}+0,270\right)=0,2726073$
$0,7880905=\text{Log}\ \overset{m}{6,150}=L$

## PROFIL 14.

$r=\overset{m}{2,81},\quad p=0,355\quad r+6p>0,50$ Formule 9.
$\text{Log}\ (3,33+2,82)^2=1,5777502$
$\text{Log}\ 2\left(\frac{2}{3}-0,355\right)=\bar{1},7947180$
$1,7830322=\text{Log}\ \overset{m.q}{60,750}$
$8,333$
$52,417=R$
$D=0$
$\text{Log}\ 2(3,33+2,82)=1,0899051$
$\text{Log}\ 2\left(\frac{2}{3}-0,355\right)=\bar{1},7947180$
$1,2951871=\text{Log}\ \overset{m}{19,75}=L$

$r=\overset{m}{2,81},\quad e=0,190\quad r>5,50e+0,50$ Formule 4.
$\text{Log}\ (3,33+2,82)^2=1,5777502$
$\text{Log}\ 2\left(\frac{2}{3}+0,190\right)=0,2338334$
$1,3439168=\text{Log}\ \overset{m.q}{22,100}$
$8,333$
$13,767=R$
$D=0$
$\text{Log}\ 2(3,33+2,82)=1,0899051$
$\text{Log}\ 2\left(\frac{2}{3}+0,190\right)=0,2338334$
$0,8560717=\text{Log}\ \overset{m}{7,175}=L$

## PROFIL 15.

$r=\overset{m}{2,88},\quad p=0,310,\quad r+6p>0,50$ Formule 9.
$\text{Log}\ (3,33+2,87)^2=1,5847834$
$\text{Log}\ 2\left(\frac{2}{3}-0,310\right)=\bar{1},8532905$
$1,7314929=\text{Log}\ \overset{m.q}{53,800}$
$8,333$
$45,467=R$

$r=\overset{m}{2,88},\quad e=0,270\quad r>5,50e+0,50$ Formule 4.
$\text{Log}\ (3,33+2,87)^2=1,5847834$
$\text{Log}\ 2\left(\frac{2}{3}+0,270\right)=0,2726073$
$1,3121761=\text{Log}\ \overset{m.q}{20,540}$
$8,333$
$12,207=R$

## CÔTÉ GAUCHE.

$D = 0$
$\text{Log}\,2\,(3{,}33 + 2{,}87) = 1{,}0934217$
$\text{Log}\,2\,(\tfrac{2}{3} - 0{,}310) = \bar{1}{,}8532905$
$1{,}2401312 = \text{Log}\;\overset{m}{17{,}400} = L$

## CÔTÉ DROIT.

$D = 0$
$\text{Log}\,2\,(3{,}33 + 2{,}87) = 1{,}0934217$
$\text{Log}\,2\,(\tfrac{2}{3} + 0{,}270) = 0{,}2726073$
$0{,}8208144 = \text{Log}\;\overset{m}{6{,}63} = L$

### PROFIL 16.

**Côté gauche.**

$r = \overset{m}{0{,}78}$, $p = 0{,}181$ $r + 6p > 0{,}50$ Formule 9.
$\text{Log}\;(3{,}33 + 0{,}77)^2 = 1{,}2255677$
$\text{Log}\,2\,(\tfrac{2}{3} - 0{,}180) = \bar{1}{,}9882601$
$1{,}2373076 = \text{Log}\;\overset{mq}{17{,}275}$
$8{,}333$
$8{,}942$

$D = 0$
$\text{Log}\,2\,(3{,}33 + 0{,}77) = 0{,}9138138$
$\text{Log}\,2\,(\tfrac{2}{3} - 0{,}180) = \bar{1}{,}9882601$
$0{,}9255537 = \text{Log}\;\overset{m}{8{,}425} = L$

**Côté droit.**

$r = \overset{m}{0{,}78}$, $c = 0{,}127$, $r > 5c$, $r < 5{,}50c + 0{,}50$ Formule 3.
$\text{Log}\;(5{,}00 + 0{,}80)^2 = 1{,}5268560$
$\text{Log}\,2\,(1 + 0{,}130) = 0{,}3541084$
$1{,}1727476 = \text{Log}\;\overset{mq}{14{,}90}$
$12{,}50$
$2{,}40 = R$

$\text{Log}\;(6{,}50 - 0{,}80)^2 = 1{,}5117497$
$\text{Log}\,2\,(1 - 0{,}130) = 0{,}2405492$
$1{,}2712005 = \text{Log}\;\overset{mq}{18{,}70}$
$2{,}40$
$21{,}100$
$20{,}625$
$0{,}475 = D$

$\text{Log}\,2\,(6{,}50 - 0{,}80) = 1{,}0569049$
$\text{Log}\,2\,(1 - 0{,}130) = 0{,}2405492$
$0{,}8163557 = \text{Log}\;\overset{m}{8{,}55} = L$

### PROFIL 17.

**Côté gauche.**

$d = 0$, $p = 0{,}114$ $r + 8p > 0{,}50$ Formule 9.
$\text{Log}\,(3{,}33 + 0{,}02)^2 = 1{,}0500896$
$\text{Log}\,2\,(\tfrac{2}{3} - 0{,}115) = 0{,}0426936$
$1{,}0073960 = \text{Log}\;\overset{mq}{10{,}150}$
$8{,}333$
$1{,}817 = R$

$D = 0$
$\text{Log}\,2\,(3{,}33 + 0{,}02)^2 = 0{,}8260748$
$\text{Log}\,2\,(\tfrac{2}{3} - 0{,}115) = 0{,}0426936$
$0{,}7833812 = \text{Log}\;\overset{m}{6{,}075} = L$

**Côté droit.**

$d = 0$, $c = 0{,}110$ Formule 1.
$R = 0$
$\text{Log}\,(6{,}50 + 0)^2 = 1{,}6258267$
$\text{Log}\,2\,(1 - 0{,}110) = 0{,}2504200$
$1{,}3754067 = \text{Log}\;\overset{mq}{23{,}750}$
$20{,}625$
$3{,}125 = D$

$\text{Log}\,2\,(6{,}50 + 0) = 1{,}1139434$
$\text{Log}\,2\,(1 - 0{,}110) = 0{,}2504200$
$0{,}8635234 = \text{Log}\;\overset{m}{7{,}30} = L$

*But et usage de la table de triangles.*

18. Les tables des superficies et des largeurs, comprises entre les pages 1 et 31, ne conviennent qu'au cas où le demi-profil en travers du terrain naturel n'est formé que d'une seule ligne droite d'un côté de l'axe. Cependant à l'aide de la table auxiliaire de triangles qui occupe les pages 31 et 32,

on peut étendre l'usage des premières tables au cas où il y aurait deux lignes droites dans le demi-profil du terrain.

Supposons, en effet (fig. 10 et 11, Pl. I), que ces deux lignes droites soient ED, EF, le gabarit adopté étant ABC. On pourra supposer que celle de ces deux lignes DE qui est la plus rapprochée de l'axe AD, est prolongée jusqu'en D'. Alors la superficie de déblai ou de remblai cherchée, dans le cas des fig. 10 et 11, se composera de la partie ADED'B et de la somme des deux triangles EHF, EHD'. Or, la première partie se trouve dans les premières tables, au moyen de la cote en déblai AD, ou en remblai, et de l'inclinaison en pente du terrain naturel DED'. La valeur de chacun des deux triangles est donnée par la nouvelle table des pages 31 et 32, au moyen de la base EH, et de l'inclinaison connue de ED et de EF. Quant à la base ou distance horizontale EH, elle se calcule très-facilement par voie de simples additions et soustractions, au moyen de la formule indiquée en tête de chacune des pages 31 et 32.

En combinant de toutes les manières possibles les deux lignes qui forment le profil en travers du terrain naturel, on voit que de la combinaison des deux inclinaisons en pente ou en rampe que peut prendre chacune de ces deux lignes, avec la position en déblai ou en remblai, résultent 12 cas différents, dans lesquels il ne faut pas toujours ajouter la somme des deux triangles auxiliaires, mais retrancher leur somme, ou ajouter ou retrancher leur différence. Ces cas et les règles correspondantes peuvent être résumés d'une manière abrégée, en désignant par les lettres P et C les inclinaisons du terrain naturel en pente ou en rampe, les plus rapprochées de l'axe, et par les mêmes lettres avec des accents, P' et C', les inclinaisons les plus éloignées de l'axe; D désignant d'ailleurs une cote en déblai, et R une cote en remblai sur l'axe.

1° Pour P, C', D. . . Et pour C, P', R. . . } ajoutez la somme des 2 triangles.

2° Pour P, P', D. . . Et pour C, C', R. . . } ajoutez ou retranchez la différence suivant que l'on a $P \gtrless P'$ / $C \gtrless C'$

3° Pour C, P', D. . . Et pour P, C', R. . . } retranchez la somme des 2 triangles.

4° Pour C, C', D. . . Et pour P, P', R. . . } ajoutez ou retranchez la différence suivant que l'on a $C \lessgtr C'$ / $P \lessgtr P'$

19. Le seul cas où la table de triangles ne pourra pas servir pour un

demi-profil formé de deux lignes droites, est celui où la ligne EF, la plus éloignée de l'axe, viendrait à rencontrer le fossé. Il faudrait alors calculer la cote AF' du point de rencontre F' de la ligne EF avec l'axe, partir ensuite de cette cote et de l'inclinaison de la ligne F'F pour chercher dans les premières tables, entre les pages 1 et 20, les superficies de déblai et de remblai correspondantes, puis ajouter ou retrancher le triangle DEF' près de l'axe, qui rétablit dans le demi-profil la ligne brisée qu'il fallait considérer : ce triangle se calcule par une simple multiplication.

Applications numériques de la table des triangles.

20. Prenons pour exemple le cas où la cote de déblai sur l'axe étant de $1^m,60$, l'inclinaison de la ligne la plus rapprochée de l'axe est de 0,050 en rampe, et l'inclinaison de la ligne la plus éloignée de 0,150 en rampe aussi, le sommet de l'angle étant à une distance de 4 mètres de l'axe, la cote de ce sommet de $0^m,20$ *au-dessus* du point de départ sur l'axe, et le gabarit de 10 mètres de largeur entre les arêtes extérieures des accotements.

La première partie de la table des superficies relatives au profil de 10 mètres (page 14), donne d'abord $13^{m.q},91$ pour la superficie de déblai correspondant à un terrain naturel de 0,050 en rampe, et à une cote en déblai de $1^m,60$. Ensuite le calcul de la base $b$, commune aux deux triangles auxiliaires, se fait au moyen de la formule

$$b=l'+c-c'-d.$$

ici l'on a

$$l'=5^m,00+1,50=6^m,50$$
$$c-c'=1^m,60+0,20=1^m,80$$
$$\text{Somme. . . . } 8^m,30$$
$$d=4^m,00$$
$$b=4^m,30$$

Connaissant la base $b$, on trouve à la page 31, les nombres $0^{m.q},47$ et $1^{m.q},59$ à la rencontre de la ligne horizontale qui commence par $4^m,25$, avec les colonnes verticales en tête desquelles sont les inclinaisons en rampe de 0,050 et de 0,015. La différence $1^{m.q},12$ de ces deux triangles doit être ajoutée ici à la superficie $13^{m.q},91$, de sorte que l'on a enfin $15^{m.q},03$ pour la superficie totale de déblai.

21. Soient prises pour second exemple les données suivantes :

Gabarit de 6 mètres de largeur ;

Cote en remblai de $0^m,75$ sur l'axe ;

Inclinaison de la ligne la plus rapprochée de l'axe, 0,250 en pente ;

Inclinaison de la ligne la plus éloignée de l'axe, 0,100 en rampe ;

Distance du sommet de l'angle à l'axe, $2^m,50$ ;

Cote de ce sommet *au-dessous* du point de départ de l'axe, $0^m,63$.

On trouve d'abord dans la quatrième partie de la table des superficies relatives au gabarit de 6 mètres (page 7), approximativement et à vue, $6^{m.q},10$ pour la superficie de remblai correspondant à la cote $0^m,75$ et à l'inclinaison 0,250.

La base $b$ se calcule ensuite au moyen de la formule

$$b=l+\frac{3}{2}(c-c')-d.$$

or, on a ici :

$$l=3^m,00$$
$$c-c'=0,75+0,63=1^m,38$$
$$\frac{1}{2}(c-c')=0^m,69$$
$$\text{Somme.} \ldots \quad 5^m,07$$
$$d=2^m,50$$
$$b=2^m,57$$

Entrant alors dans la table de la page 32 (*) avec la base $2^m,57$, ou plutôt $2^m,50$ qui s'en rapproche le plus, on trouve $1^{m.q},88$ pour la superficie du triangle qui correspond à la pente 0,250 ; et $0^{m.q},41$ pour le triangle qui correspond à la rampe 0,100. La somme $2^{m.q},29$ de ces deux triangles doit ici être retranchée de la superficie $6^{m.q},10$, ce qui donne $3^{m.q},81$ pour la valeur réelle de la superficie du profil cherché.

22. Quant aux largeurs prises par la route, dans le cas du profil brisé, elles ne peuvent se calculer facilement, et il vaut mieux les mesurer directement sur les profils en travers dessinés avec soin à une échelle convenable.

Ainsi, dans le cas du premier exemple ci-dessus, en désignant par $i$ l'inclinaison de la ligne du terrain naturel la plus éloignée de l'axe, la largeur prise par la route aura pour expression

$$L=\frac{l'+c-c'-id}{1-i}.$$

(*) Il faut avoir soin de corriger d'abord la faute signalée à la page VI.

Dans le cas du second exemple on aura

$$L = \frac{l + \frac{3}{2}(c - c') - \frac{3}{2}id}{1 - \frac{3}{2}i}.$$

23. On voit, d'après ce qui précède, que l'usage de la table de triangles exige une certaine attention, et ne laisse pas d'entraîner dans des calculs assez longs. Il est donc probable que l'on aimera souvent mieux dessiner les profils et les calculer par des mesures directes, que d'avoir recours à cette table. Aussi l'aurions-nous omise, si elle ne présentait l'avantage de servir immédiatement dans le cas assez fréquent où l'on élargit un ancien chemin en conservant son niveau. Car alors, si l'on n'a qu'à déblayer pour l'élargissement, la superficie de déblai se composera du triangle EFH (fig. 10, Planche I) augmenté de la section du fossé, qui est constante. Si le chemin est en remblai avec une largeur plus faible et un talus plus doux que la largeur et le talus que l'on veut donner, la superficie de remblai se réduit encore à un triangle EFH (fig. 11, Planche I) que donne notre table.

24. La table qui occupe les pages 52 et 53 sera fort utile pour abréger les calculs relatifs à la détermination du profil en long d'un projet de route. En effet, lorsque l'on s'occupe de cette détermination, on a souvent besoin de connaître la différence de niveau qui correspond à une longueur et à une inclinaison déterminées. Or la table donne la solution de cette question. Usage de la table pour le calcul des pentes et rampes.

Supposons en effet que l'on veuille savoir quelle est la différence de niveau entre les deux extrémités d'une rampe de 0m,047 par mètre, sur 2395 mètres de longueur.

On prendra à la page 52 la ligne horizontale qui commence par 0,047 (la quatrième à partir du bas), et on trouvera sur cette ligne les nombres suivants, savoir :

| | | |
|---|---|---|
| Pour | 2000 mètres de longueur. . . . . . . . . . . . . . . | 94m |
| | 300 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . | 14m,1 |
| | 90 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . | 4m,23 |
| | 5 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . | 0m,235 |
| Pour | 2395 mètres de longueur, on a donc une chute de | 112m,565 |

# NOTES DIVERSES

## SUR LES TABLES ET SUR LES CALCULS RELATIFS A LA RÉDACTION DES PROJETS DE ROUTES ET DE CHEMINS.

### I. *Démonstration des formules fondamentales.*

La construetion des tables des superficies et des largeurs, aussi bien que l'usage des tables de numérateurs et de dénominateurs, sont fondés sur les formules générales du n° 10. On sera probablement bien aise de trouver ici la démonstration de ces formules.

D'abord les 9 figures 12, 13, etc., jusqu'à 20 inclusivement (Planche I) répondent respectivement et par ordre aux 9 cas du tableau des formules. Le demi-gabarit, dans toutes ces figures, est représenté par les lignes ABCDE, et le terrain naturel par FE; les notations sont celles qui sont exposées en tête du tableau de la page XIV.

La méthode employée pour trouver les formules correspondant à chaque cas, consiste à considérer chaque superficie de déblai ou de remblai comme la somme ou la différence d'autres figures plus régulières, dont la quadrature dépend immédiatement des données. On emploie à chaque instant, dans ces quadratures, la considération de triangles semblables, dont l'un a pour base l'unité (le mètre), et pour hauteur la pente par mètre d'une des lignes de la figure.

Ainsi par exemple, dans la figure 12, FE étant le terrain naturel en rampe de $c$ par mètre, et le talus DE de déblai étant incliné à $t$ par mètre, si on prend $EH' = 1$, on aura $H'F = c$, et $H'O' = t$. On en conclura

$$O'F' : OF :: EH' : EH; \quad \text{or} \quad OF = OA + AF = A'B' \times t + d; \quad \text{donc} \quad EH = \frac{l't + d}{t - c}.$$

Nous n'entrerons pas dans le détail des calculs analogues qui se retrouvent à tous les cas.

Indiquons seulement la manière de procéder.

*a*). *Terrain* FE *en rampe et cote* AF *en déblai*. (Fig. 12, planche I.)

Il n'y a jamais qu'un cas à considérer, et le remblai est toujours nul.

La surface de déblai ABCDEF est la différence entre le triangle variable OEF et la figure constante OABCD.

Or le triangle OEF $= \frac{1}{2}$ OF × EH.

$$\mathrm{OF} = l't + d; \quad \mathrm{EH} = \frac{l't+d}{l-c}; \text{ fig. } \mathrm{OABCD} = \frac{l''t}{2} - \mathrm{F}.$$

Donc le système des formules, dans ce cas, est

$$(1) \qquad \left\{ \begin{array}{l} \mathrm{R} = 0, \\ \mathrm{D} = \dfrac{(l't+d)^2}{2(1-c)} - \left(\dfrac{l''t}{2} - \mathrm{F}\right). \end{array} \right.$$

*b*). *Terrain* FE *en rampe, et cote* AF *en remblai*. (Fig. 13, 14 et 15, planche I.)

Il y a trois cas à considérer.

D'abord si la parallèle BK (*fig.* 13), à la ligne du terrain naturel, n'est pas au-dessus de cette ligne, la superficie de remblai sera égale au triangle AFI, et la superficie de remblai IBCDE sera égale à la différence entre la figure OAIE, et la figure OABCD. On aura donc

Pour $r \leqq lc$

$$(2) \qquad \left\{ \begin{array}{l} \mathrm{R} = \dfrac{r^2}{2c} \\ \mathrm{D} = \dfrac{(l't-r)^2}{2(t-c)} + \mathrm{R} - \left(\dfrac{l''t}{2} - \mathrm{F}\right). \end{array} \right.$$

Lorsque la ligne EF (fig. 14) tombe entre les deux parallèles BK, CL qui lui sont menées par les points B et C, ce qu'exprime l'ensemble des deux inégalités

$$r > lc \quad \text{et} \quad r < l'c + h,$$

la superficie de remblai ABGF est la différence entre les deux triangles FGI, ABI, et la superficie de déblai GCDE est égale à la somme du remblai et du triangle EFO, diminuée de la superficie constante OABCD. De là les formules

$$(3) \quad \begin{cases} R=\dfrac{(lt+r)^2}{2(t+c)}-\dfrac{l't}{2}, \\ D=\dfrac{(l't-r)^2}{2(t-c)}+R-\left(\dfrac{l''t}{2}-F\right). \end{cases}$$

Enfin si la ligne EF du terrain naturel ne passe pas au-dessus du point C, ce qui est exprimé par la relation

$$r \geqq lc+h,$$

le déblai est nul et la superficie de remblai prend la forme d'un trapèze ABEF (fig. 15), qui est la différence entre les deux triangles IFE, IAB. On aura donc

$$(4) \quad \begin{cases} R=\dfrac{(lt+r)^2}{2(t+c)}-\dfrac{l't}{2} \\ D=0. \end{cases}$$

*c). Terrain* FE *en pente et cote* AF *en déblai.*

Les figures 16, 17 et 18, planche I, indiquent les trois cas qui correspondent aux positions que la ligne FE du terrain naturel peut occuper par rapport aux parallèles CL, BK menées à cette ligne par les points B et C.

Pour la figure 16 on a

$d \geqq lp$, et le système de formules est

$$(5) \quad \begin{cases} R=0 \\ D=\dfrac{(l't+d)^2}{2(t+p)}-\left(\dfrac{l''t}{2}-F\right). \end{cases}$$

La figure 17 est la plus compliquée de toutes. Elle correspond au système d'inégalités

$$d<lp, \quad d+h>(l'+f)p.$$

Le remblai GBM est égal au triangle IFM, plus le triangle AFG, moins le triangle IAB; et le déblai se compose du remblai, plus le triangle OFE, moins la figure OABCD. On aura donc les formules

$$(6) \quad \begin{cases} R=\dfrac{(lt-d)^2}{2(t-p)}+\dfrac{d^2}{2p}-\dfrac{l't}{2} \\ D=\dfrac{(l't+d)^2}{2(t+p)}+R-\left(\dfrac{l''t}{2}-F\right). \end{cases}$$

Enfin à la figure 18, qui répond à la relation $d+h \leqq (l'+f)p$, appartient le système de formules

$$(7) \qquad \left\{ \begin{aligned} R &= \frac{(lt'-d)^2}{2(t'-p)} + \frac{d^2}{2p} - \frac{l't'}{2} \\ D &= \frac{d^2}{2p}. \end{aligned} \right.$$

*d*). *Terrain* **FE** *en pente et cote* **AF** *en remblai.*

Deux systèmes de formules seulement correspondent à ce cas principal. Ce sont, pour la figure 19, qui satisfait à l'inégalité $r+(l'+f)p<h$, les formules

$$(8) \qquad \left\{ \begin{aligned} R &= \frac{(lt+r)^2}{2(t-p)} - \frac{l't}{2} \\ D &= \frac{(l't-r)^2}{2(t+p)} + R - \left(\frac{l''t}{2} - F\right), \end{aligned} \right.$$

et pour la fig. 20, qui satisfait à la relation $r+(l'+f)p \geqq h$, on a

$$(9) \qquad \left\{ \begin{aligned} R &= \frac{(lt'+r)^2}{2(t'-p)} - \frac{l't'}{2}, \\ D &= 0. \end{aligned} \right.$$

Quant à la largeur prise par le demi-profil en travers, elle est constamment égale à la distance du point extrême E à l'axe AF, et comme elle est la hauteur EH (fig. 12) de l'un des triangles OFE, IFE, son expression entre implicitement dans celle de l'aire de ces triangles, et a dû toujours être calculée d'abord, pour obtenir la superficie de déblai ou de remblai, comme nous l'avons montré pour la fig. 1.

II *Construction des tables pour le calcul des superficies et des largeurs.*

Lorsqu'il s'agit de construire pour un gabarit déterminé une table de superficies comme celles qui sont comprises entre les pages 1 et 20, et une table de largeurs semblables à celles qui occupent les pages 21 à 30, il faut commencer par substituer dans les formules générales du n° 10, les valeurs des constantes relatives à ce gabarit, valeurs que l'on trouvera généralement dans la table du n° 11.

Lorsque l'on a ainsi obtenu le tableau des formules applicable au gabarit que l'on considère, on cherche pour chacun des trois cas principaux différents du premier (terrain en rampe et cote en déblai), les valeurs de l'inclinaison du terrain naturel, à partir desquelles on doit passer d'un système de formules à un autre. Ce sont les inégalités contenues dans la troisième colonne du tableau des formules qui font connaître ces valeurs. Ainsi en prenant encore pour exemple le gabarit de 10 mètres de largeur (page XVI), puisque le système des formules (2) est applicable tant que $r$ ne surpasse pas $5c$, on trouvera que pour les valeurs

0,000 0,050 0,100 0,150 0,200 0,250.

successivement attribuées à $c$, les limites correspondantes de $r$, données par la relation $r = 5c$, seront

$0^m,00$ $0^m,25$ $0^m,50$ $0^m,75$ $1^m,00$ $1^m,25$.

Mais à cause de la relation $r = 5{,}50c + 0{,}50$, on obtient pour nouvelles limites de $r$,

$0^m,50$ $0^m,78$ $1^m,05$ $1^m,33$ $1^m,60$ $1^m,88$;

de sorte que l'on doit employer le système des formules (3) pour toute valeur de $r$ comprise entre $0^m,00$ et $0^m,50$ lorsque $c = 0{,}000$; entre $0^m,25$ et $0^m,78$ lorsque $c = 0{,}050$, entre $0^m,50$ et $1^m,05$, lorsque $c = 0{,}100$; entre $0^m,75$ et $1^m,33$ lorsque $c = 0{,}150$; entre $1^m,00$ et $1^m,60$, lorsque $c = 0{,}200$; entre $1^m,25$ et $1^m,88$, lorsque $c = 0{,}250$. Au delà de ces valeurs de $r$, le système des formules (4) est toujours applicable.

On trouvera aussi facilement à l'aide des relations d'inégalité qui existent entre $d$ ou $r$ et $p$, pour les systèmes de formules (5), (7) et (9), les valeurs extrêmes entre lesquelles ces formules, et par conséquent les systèmes (6) et (8) sont applicables.

Le petit tableau suivant où l'on a résumé ces calculs pour le gabarit de 10 mètres de largeur, pourra servir de modèle pour tous les calculs du même genre.

| CAS. | FORMULES | Valeurs de $c$ ou de $p$. | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0,000 | 0,050 | 0,100 | 0,150 | 0,200 | 0,250 |
| 2 | $r=5c$ | $0^{m},00$ | $0^{m},25$ | $0^{m},50$ | $0^{m},75$ | $1^{m},00$ | $1^{m},25$ |
| 4 | $r=5,50c+0,50$ | 0,50 | 0,78 | 1,05 | 1,33 | 1,60 | 1,88 |
| 5 | $d=5p$ | 0,00 | 0,25 | 0,50 | 0,75 | 1,00 | 1,25 |
| 7 | $d=6p-0,50$ | » | » | 0,10 | 0,40 | 0,70 | 1,00 |
| 9 | $r=0,50-6p$ | 0,50 | 0,20 | » | » | » | » |

On remarquera que nous avons maintenu dans nos tables des superficies et des largeurs les tracés des limites d'application de deux systèmes de formules consécutifs. Ainsi, à la page 14, dans la deuxième table qui concerne le terrain en rampe et la cote en remblai, on voit deux séries de traits horizontaux qui descendent en échelons, à partir de $0^{m},000$ jusqu'à $0^{m},250$ d'inclinaison par mètre du terrain naturel. Les traits de la première série, pour les inclinaisons

0,000 0,050 0,100 0,150 0,200 0,250,

tombent respectivement entre les remblais

$0^{m},00$ et $0^{m},20$; $0^{m},20$ et $0^{m},40$; $0^{m},40$ et $0^{m},60$; $0^{m},60$ et $0^{m},80$; $1^{m},00$ et $1^{m},20$; $1^{m},20$ et $1^{m},40$;

les traits de la seconde série, pour les mêmes inclinaisons, tombent respectivement entre les remblais

$0^{m},40$ et $0^{m},60$; $0^{m},60$ et $0^{m},80$; $1^{m},00$ et $1^{m},20$; $1^{m},20$ et $1^{m},40$; $1^{m},40$ et $1^{m},60$; $1^{m},80$ et $2^{m},00$.

Ces deux séries de traits sont donc bien placées, entre les limites d'application des systèmes (2), (3) et (4), de formules de la page XVI. Tous les nombres placés dans la table, au-dessus de la première série de traits ont été calculés par le système (2); tous les nombres placés au-dessous de la seconde, ont été calculés par le système (4); enfin les nombres intermédiaires ont été calculés par le système (3).

On comprendra sans peine aussi, comment les échelons successifs de la seconde table de la page 28, séparent les nombres calculés par la formule $L=\frac{6^{m},50-r}{1-c}$, de ceux qui ont été calculés par la formule $L=\frac{3^{m},33+r}{\frac{2}{3}+c}$.

Ces limites de séparation par échelons se reconnaitront facilement dans toutes nos tables de superficies et de largeurs. Elles vont constamment en descendant pour la deuxième et la troisième des quatre tables qui concernent chaque gabarit, et en montant pour la quatrième. Quant à la première des tables des superficies et des largeurs, elle est toujours calculée par le système des formules (1), et elle ne renferme par conséquent pas de traits de séparation. Mais il y a lieu de faire observer que dans le troisième tableau des superficies, pour chaque gabarit, un trait gras, vertical, placé dans l'alignement des filets qui séparent les nombres relatifs à deux pentes consécutives, indique toujours la limite extrême à gauche de la première série d'échelons descendants. Pour le profil de 10 mètres, ce trait se trouve placé à la première table de la page 15, entre les pentes 0,50 et 0,100, au troisième double filet vertical.

Lorsque l'on a ainsi préparé, pour la table que l'on veut calculer, les cadres qui doivent renfermer les nombres déterminés par chaque système de formules, la méthode la plus expéditive et la plus sûre, pour la formation de ces tables, consistera à calculer *directement* chaque formule en y substituant les valeurs successives de l'inclinaison du terrain naturel et de la cote sur l'axe; puis à vérifier les nombres obtenus par une même formule, pour une même inclinaison du terrain naturel, en cherchant les *différences premières* de ces nombres, s'il s'agit d'une largeur, et leurs *différences secondes*, s'il s'agit d'une superficie de déblai ou de remblai. Ces différences doivent être constantes.

Ainsi prenons dans la troisième table des superficies, relative au gabarit de 10 mètres (p. 15), les nombres

$$\overset{mq}{2{,}04} \quad \overset{mq}{3{,}38} \quad \overset{mq}{4{,}75} \quad \overset{mq}{6{,}16} \quad \overset{mq}{7{,}61} \quad \overset{mq}{9{,}09} \quad \text{etc.};$$

qui correspondent respectivement aux cotes de déblai équidistantes $0^m,40$, $0^m,60$, $0^m,80$, $1^m,00$, $1^m,20$ $1^m,30$, etc.; la pente par mètre étant constamment de $0^m,050$. En retranchant chaque nombre du suivant, on obtiendra la série

$$\overset{mq}{1{,}34} \quad \overset{mq}{1{,}37} \quad \overset{mq}{1{,}41} \quad \overset{mq}{1{,}45} \quad \overset{mq}{1{,}48}, \quad \text{etc.},$$

dans laquelle chaque nombre retranché du précédent donne

$$\overset{mq}{0{,}03} \quad \overset{mq}{0{,}04} \quad \overset{mq}{0{,}04} \quad \overset{mq}{0{,}03}, \quad \text{etc.};$$

donc les différences secondes sont sensiblement égales et oscillent autour d'une valeur constante comprise entre 0,03 et 0,04.

En prenant, dans la table des largeurs (p. 28), les nombres qui correspondent au même gabarit, à la même inclinaison du terrain naturel et aux mêmes cotes de déblai, on trouve la suite

$$6^{m},57 \quad 6^{m},76 \quad 6^{m},95 \quad 7^{m},14 \quad 7^{m},33\ldots$$

dans laquelle les différences premières

$$0^{m},19 \quad 0^{m},19 \quad 0^{m},19 \quad 0^{m},19\ldots.$$

sont égales.

Quant au calcul direct des formules, il devra être opéré par logarithmes, soit avec les tables ordinaires, soit avec nos tables auxiliaires de numérateurs et de dénominateurs.

### III. *Représentation géométrique des formules et de divers résultats relatifs à l'établissement des tables des superficies et des largeurs.*

Soient $dr$ et $cp$ (fig. 21, planche I), deux droites rectangulaires qui se coupent en O. Comptons sur la première dans les sens O$d$ et O$r$, des quantités respectivement proportionnelles aux cotes de déblai $d$ et de remblai $r$; sur la seconde dans les sens O$c$ et O$p$ des quantités respectivement proportionnelles aux rampes $c$ et aux pentes $p$, par mètre du terrain naturel.

Supposons que C et D soient les limites supérieures que l'on adopte respectivement pour la valeur des inclinaisons du terrain naturel et des cotes sur l'axe. Prenons OA$=$OA'$=$C, OB$=$OB'$=$D, et construisons le rectangle MNQS qui se trouve décomposé en quatre rectangles égaux, OAMB, OASB', OA'NB, OA'QB'.

Tous les points renfermés dans l'intérieur du premier de ces rectangles auront pour coordonnées des valeurs qui représentent, savoir: l'une parallèle à O$c$, une inclinaison du terrain naturel en *rampe*; l'autre parallèle à O$d$, une cote de *déblai*; et par conséquent tous les couples de valeurs de $c$ et de $d$, qui peuvent servir au calcul des formules (1), appartiennent à l'un des points du rectangle OAMB.

De même tous les couples de valeurs de $c$ et de $r$, qui peuvent servir

au calcul des formules (2), (3) et (4), appartiennent à un point situé dans l'intérieur du rectangle OASB′; les couples de valeurs de $p$ et de $d$ qui peuvent servir à calculer l'une des formules (5), (6) et (7), sont les coordonnées d'un point du rectangle OA′NB; enfin les couples de valeurs de $p$ et de $r$ que l'on peut substituer dans l'une des formules (8) ou (9) appartiennent à l'un des points du rectangle OA′QB′.

Mais comment distinguer dans les trois derniers rectangles, les points qui appartiennent aux diverses formules relatives à un même cas principal? Par exemple, dans le rectangle OASB′, quels seront les points dont les coordonnées $c$ et $r$ devront être substituée dans les formules (2), (3) ou (4)?

Pour résoudre cette question, construisons sur notre figure les droites

| | | |
|---|---|---|
| OE | représentées respectivement par les équations | $r = lc$ |
| FL | | $r = l'c + h$ |
| OH | | $d = lp$ |
| GK | | $d + h = (l' + f)p$ |
| GF | | $r + (l' + f)p = h.$ |

Or il est facile de voir que pour tous les points situés entre les droites $Oc$ et OE, on a $r < lc$; pour tous les points situés entre OE et FL, $r > lc$ et $r < l'c + h$; pour tous les points situés au-dessous de FL vers B′S, $r > l'c + h$. Donc les points compris dans l'intérieur du triangle OAE, du trapèze OELF et du trapèze FLSB′ ont des coordonnées qui doivent être employées respectivement dans les formules (2), (3) et (4). On a marqué ainsi par des chiffres, toutes les parties du rectangle total MNQS qui correspondent aux formules de même rang pour le calcul des superficies et des largeurs.

Cette représentation géométrique si simple et si expressive, conduit à plusieurs conséquences remarquables sous le double point de vue de la pratique et de la théorie. D'abord, pour ce qui concerne la pratique, il est évident que si la figure 21 est construite à une échelle suffisamment grande pour le gabarit que l'on considère, on pourra s'en servir pour reconnaître, sans aucun calcul, quel est le système de formules applicables à une cote et à une inclinaison quelconques; soit lorsque l'on dresse des tables de superficies et de largeurs, soit lorsque l'on emploie les tables auxiliaires au calcul d'une superficie ou d'une largeur déterminée.

De plus, si l'on imagine que par tous les points situés dans l'intérieur

du rectangle MNQS on élève perpendiculairement au plan de ce rectangle des droites proportionnelles aux superficies de déblai ou de remblai, ou aux largeurs correspondant aux coordonnées de ces points, les extrémités de ces perpendiculaires seront, pour chaque formule particulière, sur une même surface courbe. Or, en projetant sur le plan de chacune des parties du rectangle les lignes de niveau que l'on peut imaginer sur les surfaces courbes correspondantes, on connaîtra, à l'inspection seule de ces lignes, les valeurs des superficies et celles de la largeur qui résultent d'une cote sur l'axe et d'une inclinaison déterminées.

Les courbes de niveau formées par la formule

$$D = \frac{(6^m,50+d)^2}{2(1-c)} - 20,625$$

ont été ainsi construites et cotées dans le rectangle OAMB, pour des valeurs de D croissant de 10 en 10. On voit que le point dont les coordonnées sont $c=0,250$ et $d=1^m,80$ tombe entre les courbes cotées 20 et 30, à peu près à égale distance de ces courbes : donc la valeur correspondante de D est d'environ $25^{m.q.}$. On trouve dans la table de la page 14, $D=25^{m.q.},30$.

On voit donc que si l'on avait construit pour un gabarit particulier, dans les neuf parties du rectangle MNQS, des lignes de niveau suffisamment rapprochées, en distinguant ces lignes par des notations particulières, selon qu'elles correspondent aux déblais, aux remblais ou aux largeurs, on posséderait une figure qui pourrait très-bien remplacer les tables spéciales de superficies et de largeurs.

Cette idée de la substitution d'un plan coté à une table à double entrée, peut être appliquée avec succès à d'autres calculs qu'à celui des superficies de déblai et de remblai ; et pour cette destination spéciale, elle conduit à des considérations curieuses qui seront développées dans un travail que l'on espère publier bientôt. Les personnes qui s'occupent des applications de la géométrie pure à l'art de l'ingénieur, verront avec intérêt des résultats extrêmement utiles dans la pratique, déduits immédiatement de la discussion de courbes et de surfaces du second au quatrième degré.

La considération de la figure 21 conduit encore à plusieurs conséquences curieuses. D'abord les aires de chacune des neuf parties de cette figure ont entre elles les mêmes rapports que les nombres de cas que l'on est obligé de calculer par les systèmes de formules correspondants, lors-

que l'on dresse, pour un certain gabarit, une table des superficies et des largeurs. Ensuite, si l'on regarde comme également possibles toutes les cotes de l'axe et toutes les inclinaisons du terrain naturel, les rapports des aires des neuf parties de la figure à l'aire du rectangle total MNQS, représentent les probabilités de tomber sur les systèmes de formules, portant les mêmes numéros d'ordre.

On a réuni, dans le tableau suivant, les résultats relatifs aux formules générales et à leurs applications au gabarit de 10 mètres de largeur, lorsque l'on prend $C = 0{,}500$, $D = 10^m{,}00$, et que l'on imagine une table calculée pour des cotes sur l'axe variant de $0^m{,}02$ en $0^m{,}02$, et pour des inclinaisons du terrain naturel variant de 0,005 en 0,005, ce qui porte à 200000 le nombre total des cas calculés dans la table.

*Résultats divers tirés de la considération de la figure 21.*

| VALEURS des différentes parties de la figure. | INDICATION des formules. | SUPERFICIES ABSOLUES des différentes parties de la figure. | NOMBRES des cas calculés par chaque système de formules. | SUPERFICIES RELATIVES. | PROBABILITÉS respectives de chaque système de formules |
|---|---|---|---|---|---|
| $OA = C$, $OB = D$ | 1 | $OAMB = CD$ | 50 000 | $\frac{1}{4}$ | 0, 250 000 |
| $AE = lC$ | 2 | $OAE = \frac{1}{2} lC^2$ | 6 250 | $\frac{lC}{8D}$ | 0, 031 250 |
| $OF = h$, $EL = (l - l')C + h$ | 3 | $OFLE = \frac{1}{2}(l' - l)C^2 + hC$ | 3 125 | $\frac{\frac{1}{2}(l' - l)C + h}{4D}$ | 0, 015 625 |
| $FB' = D - h$, $LS = D - (l'C + h)$ | 4 | $FLSB' = (D - h)C - \frac{1}{2} l'C^2$ | 40 625 | $\frac{(D - h) - \frac{1}{2} l'C}{4D}$ | 0, 203 125 |
| $A'K = lC$ | 5 | $OKNB = CD - \frac{1}{2} lC^2$ | 43 750 | $\frac{D - \frac{1}{2} lC}{4D}$ | 0, 218 750 |
| $OG = \frac{h}{l' + f}$, $A'H = (l' + f)C - h$ | 6 | $OKHG = \frac{1}{2} lC^2 - \frac{[(l' + f)C - h]^2}{2(l' + f)}$ | 1 042 | $\frac{lC}{8D} - \frac{[(l' + f)C - h]^2}{8(l' + f)CD}$ | 0, 005 210 |
| | 7 | $GHA' = \frac{[(l' + f)C - h]^2}{2(l' + f)}$ | 5 208 | $\frac{[(l' + f)C - h]^2}{8(l' + f)CD}$ | 0, 026 040 |
| Lorsque l'on fait $C = 0{,}500$, $l' = l + f$ et $f = h$, il vient $A'K = A'H$, et les points K et H se confondent sur la droite A'N | 8 | $OGF = \frac{h^2}{2(l' + f)}$ | 208 | $\frac{h^2}{8(l' + f)CD}$ | 0, 001 040 |
| | 9 | $GFB'QA' = CD - \frac{h^2}{2(l' + f)}$ | 49 792 | $\frac{1}{4} - \frac{h^2}{8(l' + f)CD}$ | 0, 248 960 |
| Totaux. . . . . . . . . | | Rectangle $MNQS = 4CD$ | 200 000 | 1 | 1, 000 000 |

La figure 21 elle-même a été construite pour le gabarit de 10 mètres, en donnant par conséquent aux constantes $l$, $l'$, $h$ et $f$, les valeurs du n° 12, et en faisant C = 0,500, D = 10$^{m}$,00 ; l'échelle des abscisses ($c$, $p$) est de 0$^{m}$,0001 pour millième d'inclinaison du terrain naturel, et celle des ordonnées ($d$, $r$) de 0$^{m}$,0001 pour centimètre de cote sur l'axe.

Il est vrai que toutes les cotes et toutes les inclinaisons ne sont pas également possibles dans la pratique. Mais en chacun des points du rectangle MNQS élevons une droite perpendiculaire au plan de ce rectangle et proportionnelle au nombre de fois résultant du relevé exact où l'expérience a fait rencontrer ce système de coordonnées qui déterminent ce point. Les extrémités de toutes ces perpendiculaires formeront une surface courbe ; et les rapports entre les volumes terminés par cette surface et projetés horizontalement sur les neuf parties du rectangle MNQS, et le volume total, sont les probabilités exactes de tomber sur le système de formules correspondant, toutes les circonstances relatives à la configuration du sol et au tracé des routes restant d'ailleurs les mêmes.

IV. *De différents procédés numériques graphiques et mécaniques proposés ou mis en usage pour abréger les calculs relatifs à la rédaction des projets de routes et de chemins.*

Le calcul des dépenses qu'exigent les mouvements de terres pour la confection d'une route, d'un chemin de fer, d'un canal, etc., est le plus important de ceux qui entrent dans la rédaction d'un projet.

Si on cherche d'abord le volume des terres à mettre en mouvement, ce volume peut se déduire très-simplement, par la méthode des cubatures approchées, de la mesure des superficies de déblai et de remblai sur des profils en travers espacés convenablement. C'est donc cette mesure des superficies que l'on a d'abord cherché à simplifier.

Le premier travail qui ait été publié sur le calcul des superficies au moyen de formules et de tables, est dû à M. Fourier, ingénieur attaché au service des routes stratégiques (*Tables des surfaces de déblai et de remblai*, etc. Angers, 1833). Il est certain que déjà, dans plusieurs départements, quelques ingénieurs s'étaient servis de formules et de tables analogues pour abréger les calculs de ce genre. On n'en doit pas moins reconnaître que la publication de M. Fourier a été le signal d'une véritable révolution dans la manière de calculer les terrassements d'un projet de route. Les tables de

cet ingénieur ne s'appliquaient qu'au gabarit de 8 mèt., et dans des limites assez resserrées; mais bientôt M. le directeur général des ponts et chaussées et des mines en fit calculer de nouvelles sous la direction de M. l'ingénieur en chef Coriolis. Celles-ci, qui furent successivement lithographiées en 1835, en 1836 et en 1837, s'appliquent aux gabarits de 8, de 10, puis de 7, 9 et 12 mètres de largeur sans les fossés. Elles sont accompagnées d'une instruction étendue sur la manière dont elles sont construites et sur leur usage. M. Coriolis y indique les séparations rectilignes des nombres calculés par les formules relatives à un des quatre cas principaux. (Voir les pages XXXVII et XL, notes II et III). Il y donne aussi les formules générales du n° 10.

Cependant les premières tables lithographiées ne furent envoyées aux ingenieurs que le 18 janvier 1836; et antérieurement à cette époque, plusieurs ingénieurs que M. Coriolis a cités avaient adressé à l'administration des mémoires où ils proposaient des méthodes de calcul et des formes de tables analogues à celles des tables lithographiées.

Cependant les cotes de déblai et de remblai sur l'axe, les inclinaisons du terrain naturel de chaque côté de l'axe, les talus de déblai et de remblai, les largeurs des routes et de leurs fossés, varient entre des limites si étendues, qu'on reconnut bientôt la nécessité de suppléer aux tables lithographiées pour les cas où elles ne pouvaient servir. C'est dans le but de satisfaire à ce vœu que les *Tables nouvelles pour abréger divers calculs relatifs aux projets de routes, et particulièrement les calculs des terrasses et des plans parcellaires* (Imprimerie royale, février 1839), dont le projet avait été présenté à M. le directeur général des ponts et chaussées et des mines, le 14 janvier 1838, furent calculées et publiées par ses ordres. Ces tables ne donnent point immédiatement les superficies de déblai et de remblai; mais elles servent, dans des limites fort étendues et qui comprennent tous les cas possibles, à trouver ces superficies à l'aide d'une addition et d'une soustraction. Elles donnent aussi facilement les largeurs prises de chaque côté de l'axe du projet, largeurs du calcul desquelles on ne s'était point encore occupé, malgré son importance.

La *table de triangles*, dont les calculs ont été faits sous la direction de M. Coriolis, d'après les observations présentées par M. l'ingénieur Hernoux, et qui a été lithographiée en février 1838, a été envoyée aux ingénieurs en même temps que les *Tables nouvelles* avec une circulaire en date du 27 mars 1840.

Enfin on a réuni, dans le présent recueil, la substance de toutes les tables précédemment publiées, en y ajoutant, pour les largeurs de tous les gabarits, et pour les superficies des gabarits de 4, de 5, de 6 et de 11 mètres, des tables complétement inédites.

Cependant plusieurs ingénieurs ont imaginé des moyens mécaniques ou graphiques pour éviter les longs calculs qu'entraîne l'évaluation numérique des superficies de déblai et de remblai, dans les cas qui échappent aux tables ordinaires. On avait proposé depuis longtemps, déjà, de découper des feuilles de plomb suivant les formes des profils en travers, de manière à connaître les valeurs des superficies par les poids correspondants. Mais les longueurs et les difficultés de ce procédé avaient dû y faire renoncer aussitôt.

M. l'ingénieur en chef Cousinery, dans son intéressant ouvrage intitulé *Le calcul par le trait* (Paris, 1839), a donné la description d'une règle transparente, au moyen de laquelle on peut obtenir par mesure linéaire la superficie d'un triangle ou d'un quadrilatère. Mais l'usage de cet instrument exige quelques tracés préliminaires, et ne saurait s'appliquer qu'avec plusieurs décompositions à la mesure des superficies de déblai et de remblai, dans un assez grand nombre de cas, même lorsque ces superficies sont données par une formule unique.

On doit à M. l'ingénieur en chef Dupuit un autre procédé mécanique très-simple, et qui paraît pouvoir être appliqué avec succès à la mesure de certaines superficies. A l'aide d'un papier transparent sur lequel sont tracées des droites parallèles équidistantes, et d'une roulette munie d'un index fixe et d'un compteur, M. Dupuit fait la somme des ordonnées équidistantes de la surface, et il lit cette somme sur le compteur convenablement gradué par rapport à la distance constante qui sépare les parallèles du transparent. En d'autres termes, il décompose la figure en une série de trapèzes contigus ayant pour hauteur commune l'unité, de sorte qu'il n'y a qu'à prendre la somme des bases communes à tous ces trapèzes, plus le double de la somme des bases extrêmes.

Ce procédé simple et ingénieux peut être utile pour la mesure des superficies où les ordonnées équidistantes ne sont pas trop courtes, et dont les contours n'éprouvent pas de changements brusques entre deux ordonnées consécutives. Mais pour des cas analogues à ceux de nos fig. 13, 14, 17, 18 et 19, pl. I, comme pour ceux où la figure polygonale à mesurer aurait des angles considérables très-rapprochés les uns des autres, la rou-

lette de M. Dupuit ne paraît pas offrir une exactitude et une célérité suffisantes.

Nous passons ici sous silence d'autres instruments ou procédés analogues qui ont été proposés ou employés pour la mesure des aires planes. La plupart de ces procédés ont des inconvénients qui ont empêché de les adopter. Il faut excepter toutefois l'admirable *planimètre*, commencé dès 1827 par M. Oppikofer, ingénieur au service du canton de Berne, et que M. Ernst, actuellement constructeur d'instruments de précision à Paris, amena bientôt à un haut degré de perfection. Le planimètre, recommandé par l'administration du cadastre, employé avec succès par plusieurs géomètres en chef de ce service, approuvé dans les termes les plus favorables par l'académie des sciences dès le 2 juin 1834, sur le rapport de MM. Navier et Puissant, admis à partager le prix de mécanique Montyon, décerné par ce corps savant dans sa séance du 21 août 1837, donne avec une exactitude et une célérité merveilleuses la mesure des aires planes les plus compliquées. Il suffit de promener une pointe sur le contour de la figure à mesurer, pour trouver sur un compteur à cadran la valeur de la superficie cherchée en mètres carrés. Le planimètre de MM. Oppikofer et Ernst n'est arrêté par aucune des difficultés que l'on éprouve dans l'usage des autres procédés d'évaluation des superficies irrégulières; son utilité serait donc déjà incontestable dans la rédaction des projets, pour la mesure des parcelles occupées par la voie de la communication nouvelle, et pour celle des profils en travers non compris dans les tables.

En faisant ainsi concurremment usage de tables numériques ou graphiques (page XLI) et du planimètre, on effectue d'une manière plus prompte que par aucun autre procédé toutes les opérations relatives à la mesure des superficies dans les projets. Mais il reste encore un nombre considérable de calculs numériques à faire, et il est assez remarquable que, jusqu'à ces derniers temps, personne n'eût cherché des moyens propres à les simplifier. Ainsi la rédaction du *tableau du mouvement des terres et de leur emploi de déblai en remblai*, qui sert à connaître la distance moyenne du transport, élément si important du prix de revient du mètre cube de terrassements, est une opération dont les difficultés et la longueur sont connues de tous ceux qui l'ont effectuée. C'est pour éviter, ou au moins abréger cette opération, que l'on avait proposé dès l'année 1835, dans un département où la rédaction des projets ab-

sorbait une partie notable du temps des ingénieurs, une *balance à calcul* fondée sur la loi générale de l'équilibre du levier. Cet instrument, dont l'administration fit construire deux modèles, fut approuvé par l'académie des sciences dans la séance du 25 novembre 1839.

Mais en poursuivant les recherches entreprises à ce sujet, on finit par reconnaître que le planimètre de MM. Oppikofer et Ernst pouvait, à l'aide de modifications très-simples, servir à beaucoup d'autres usages qu'à la mesure des surfaces planes. L'*arithmoplanimètre* (1), ou planimètre rendu propre à effectuer les calculs aussi bien que les opérations de planimétrie, est une machine à dessiner d'une rare précision; muni d'échelles logarithmiques, il calcule le produit d'un nombre quelconque de facteurs élevés à des puissances quelconques, entières ou fractionnaires, positives ou négatives; même quand il n'y a que des échelles de parties égales, il effectue la multiplication et la division ordinaires; enfin, ce qui est encore plus important, il ramène à une opération mécanique très-simple, sans aucun calcul, la recherche du résultat final du tableau du mouvement des terres. Ce dernier usage est fondé sur un théorème nouveau, dont l'énoncé abstrait est fort compliqué, mais dont la représentation géométrique peut être donnée d'une manière assez simple. Soit AB (fig. 22, pl. II) une droite au-dessus de laquelle on élève ou on abaisse par échelons successifs les perpendiculaires $1D_1'$, $2D_1'$, $R_1 3$, $R_1'4$, $R_1''5$, etc., respectivement proportionnelles aux volumes de déblai ou de remblai entre lesquels des mouvements doivent être opérés, et placées à des distances les unes des autres proportionnelles à celles des centres de gravité de ces volumes. Si l'on compte toujours par échelons ascendants les volumes de déblai indiqués par les lettres D, et par échelons descendant les volumes de remblai désignés par les lettres R, et que l'on ait commencé par rendre égaux les volumes totaux de déblai et de remblai, ce qui est facile au moyen de retroussements ou d'emprunts convenables, l'extrémité de la droite $R_1 20$, qui représente le dernier déblai ou remblai, tombera sur AB; alors la somme des aires polygonales rectangulaires comprises entre les échelons successifs et la droite AB, exprimée en mètres carrés, divisée par le volume total du déblai, donnera la distance moyenne cherchée du transport de déblai en remblai. Cette expression géométrique du théorème pourra servir à abréger la recherche de la

(1) Voir les *Annales des ponts et chaussées*, 2ᵉ sem., 1840, page 3.

distance moyenne par la mesure directe de ces aires polygonales, dessinées préalablement, et, à plus forte raison, si l'on a recours à un instrument propre à évaluer des surfaces de ce genre. Mais l'arithmoplanimètre surtout, par le moyen de règles graduées mobiles dans des coulisses, et d'index mobiles sur les règles, se prête avec une merveilleuse facilité à la mesure de ces aires polygonales *sans qu'on soit obligé de les dessiner.*

Cet instrument, approuvé par l'Académie des sciences, le 4 mai 1840, et auquel le conseil général des ponts et chaussées a accordé, à l'unanimité, une approbation non moins flatteuse, dans sa séance du 26 du même mois, paraît donc destiné à rendre les plus grands services aux ingénieurs. On a lieu de croire que l'arithmoplanimètre étant employé concurremment avec des tables numériques, ou peut-être même avec des tables graphiques de superficies et de largeurs semblables à celles qui ont été indiquées à la page XLI, et suffisamment étendues, tous les calculs relatifs à la rédaction des projets se trouveront réduits à un degré de simplicité qu'il serait difficile de surpasser.